

Determining the Concentration, Seasonal Changes and Shelf Life of Natural Radioactive Particles in the Air of Tehran

Sh. Ghorbani, A. Saeidi, B. Oroji*

Abstract

One of the most important challenges of nuclear accidents is the release and suspension of radioactive particles in the atmosphere. Knowing the behavior of these particles in the atmosphere will optimize management and subsequent decisions of unforeseen events. Using natural radioactive particles as environmental tracers to study atmospheric pollutants is one of the key and important studies in conducting atmospheric research. In order to determine the concentration of Pb-210, Bi-210 and Po-210 radionuclides, as well as to estimate the residence time of radioactive particles, sampling was done on a monthly basis from November 1400 to October 1401 in Tehran. The samples were taken by a high volume sampling pump with an average flow rate of 1.5 cubic meters per minute with a time interval of 6 to 12 hours and were prepared and counted in the Atomic Energy Organization. The results of the monthly average concentration of radionuclides show that the highest measured value for Pb-210 was 1.25 mBq/m³ in October. The average annual concentration for this parameter was around 0.89 mBq/m³, and its lowest value was recorded in April with a value of 0.42 mBq/m³. The results showed a relative increase in the concentration of this variable for April and May and a relative decrease for September and December. The average measured concentration for the variable Po-210 in the whole period was about 0.058 mBq/m³. Also, 0.095 mBq/m³ in December is the highest concentration and 0.032 mBq/m³ in January is the lowest value measured for this radionuclide. The same trend was observed for Bi-210 with an overall average of 0.42 mBq/m³ for the period under review. The highest and lowest values measured for this radionuclide in the entire study period were 0.85 and 0.18 mBq/m³, respectively. According to the obtained results, based on Pb-210/Po-210, the average residence time of suspended particles was estimated to be 20.1 days. Based on this, July with an average of 22.5 days and January with an average of 17.8 days were estimated as the maximum and minimum length of stay measured in this research work. The obtained results can help in formulating the release and inhalation scenarios of radioactive particles caused by nuclear accidents.

Key Words: *Radioactive Particulate Matter, Atmospheric Residence Time, Particle Activity, Concentration, Tehran Air*

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



*Researcher, Faculty and Research Institute of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein University, Tehran, Iran. (balaloroji@yahoo.com) -Writer-in-Charge

تعیین غلظت، تغییرات فصلی و مدت زمان ماندگاری ذرات

پرتوزای طبیعی در هوای تهران

شهاب قربانی^۱، علی سعیدی^۲، بلال اروجی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های حوادث هسته‌ای میزان انتشار و تعلیق ذرات پرتوزا در اتمسفر است. اطلاع از رفتار این ذرات در جو مدیریت و تصمیمات بعدی از اتفاقات پیش‌بینی نشده را بهینه‌تر خواهد کرد. استفاده از ذرات پرتوزای طبیعی به‌عنوان ردیاب‌های محیطی برای مطالعه آلاینده‌های اتمسفری یکی از مطالعات کلیدی و مهم در انجام تحقیقات اتمسفری است. برای بررسی تعیین غلظت رادیونوکلئیدهای سرب ۲۱۰، بیسموت ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ و همچنین تخمین زمان اقامت برای کل ذرات معلق پرتوزا به‌صورت ماهانه از آبان ماه ۱۴۰۰ الی مهرماه ۱۴۰۱ در شهر تهران نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌ها توسط پمپ نمونه‌بردار حجم بالا با دبی متوسط ۱/۵ مترمکعب در دقیقه با بازه زمانی ۶ تا ۱۲ ساعت انجام و در سازمان انرژی اتمی آماده‌سازی و شمارش شدند. نتایج میانگین ماهیانه غلظت رادیونوکلئیدها نشان می‌دهد که بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده برای سرب ۲۱۰ در مهرماه با $1/25 \text{ mBq/m}^3$ بود. متوسط غلظت سالیانه برای این پارامتر در حدود $0/89 \text{ mBq/m}^3$ بود که کمترین مقدار آن در فروردین‌ماه با مقدار $0/42 \text{ mBq/m}^3$ ثبت شد. نتایج نشان از افزایش نسبی در غلظت این متغیر برای فروردین و اردیبهشت‌ماه و کاهش نسبی برای شهریور و دی‌ماه بود. میانگین غلظت اندازه‌گیری شده برای متغیر پلونیوم ۲۱۰ در کل دوره حدود $0/58 \text{ mBq/m}^3$ بود. همچنین $0/95 \text{ mBq/m}^3$ در آذرماه به‌عنوان بیشترین غلظت و $0/32 \text{ mBq/m}^3$ در دی‌ماه به‌عنوان کمترین مقدار اندازه‌گیری شده برای این رادیونوکلئید است. همین روند برای بیسموت ۲۱۰ نیز با میانگین کلی $0/42 \text{ mBq/m}^3$ برای دوره بررسی مشاهده شد. بیشترین و کمترین مقدار اندازه‌گیری شده برای این رادیونوکلئید در کل دوره بررسی به ترتیب $0/85$ و $0/18 \text{ mBq/m}^3$ بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده بر مبنای سرب ۲۱۰/پلونیوم ۲۱۰ میانگین زمان اقامت ذرات معلق ۲۰/۱ روز تخمین زده شد. بر این اساس تیرماه با میانگین ۲۲/۵ روز و دی‌ماه ۱۷/۸ روز به‌عنوان بیشترین و کمترین زمان اقامت اندازه‌گیری شده در این کار پژوهشی تخمین زده شد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در تدوین سناریوهای انتشار و استنشاق ذرات پرتوزای ناشی از حوادث هسته‌ای کمک نماید.

کلیدواژه‌ها: ذرات معلق پرتوزا، زمان اقامت اتمسفری، اکتیویته ذرات، غلظت، هوای تهران



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^۱ کارشناسی ارشد پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران،

^۲ دانشیار پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ پژوهشگر پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (balaloroji@yahoo.com) - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

تحقیقاتی از شرایط حساسی برخوردار بوده و داشتن اطلاعات مهم و اساسی در مواجهه با بحران‌های طبیعی و انسانی با موضوع انتشارات هسته‌ای امری ضروری و حیاتی محسوب می‌شود.

یکی از ویژگی تحقیقات انجام شده در این زمینه محدود بودن تعداد ایستگاه‌های نمونه‌برداری است. در پژوهشی جیا و جیا (۲۰۱۴)، به بررسی زمان اقامت ذرات اتمسفری در منطقه جنوب ایتالیا با توجه به نسبت سرب $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ پرداخته‌اند. آن‌ها غلظت این دو ذره در نمونه‌های برداشت‌شده در تورنتو را برای ماه نوامبر ۲۰۰۸ و ماه مه ۲۰۰۹ اندازه‌گیری و غلظت سرب ^{210}Pb بین 122 mBq/m^3 تا $11/9$ و غلظت پلونیوم ^{210}Po را بین 300 mBq/m^3 تا $11/5$ اعلام کردند. آن‌ها همچنین نسبت غلظت سرب $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ در این منطقه را بین $0/273$ تا $0/174$ اندازه‌گیری و مدت‌زمان اقامت ذرات معلق در اتمسفر منطقه مورد مطالعه را بین $49/7$ تا $8/89$ روز تخمین زدند.

رام و سارین (۲۰۱۲)، به بررسی غلظت سرب ^{210}Po و پلونیوم ^{210}Pb و نسبت سرب $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ ذرات اتمسفری در هند پرداخته و غلظت‌ها را در حدود $1/8\text{ mBq/m}^3$ و $0/094\text{ mBq/m}^3$ اندازه‌گیری کردند. تنوع زمانی فعالیت و غلظت سرب ^{210}Po در ماه‌های نوامبر، دسامبر، اکتبر و فوریه بیشتر از سایر ماه‌های سال است. آن‌ها این تغییرات را مرتبط به تولید گازهای گلخانه‌ای در منطقه دانستند [۶]. لونگبو (۲۰۱۳)، در پی حادثه فوکوشیما به بررسی تغییرات غلظت ذرات پرتوزا در چین پرداخته و برای این کار از سزیم ^{137}Cs ، سزیم ^{134}Cs و ید ^{131}I و گاز رادیواکتیو زنون (^{133}Xe) استفاده کردند. آن‌ها میزان این ذرات در لایه‌های مختلف منطقه شیان چین را اندازه و به مقادیری که از حد استاندارد چین بیشتر بود، رسیده بودند [۷]. کریستودایس و همکاران (۲۰۱۴)، با یک مطالعه کلی در سطح جهانی و یک مطالعه موردی در نواحی شرق مدیترانه به بررسی ارزیابی پراکنش اتمسفر ذرات پرتوزا در نواحی که اتفاقات هسته‌ای رخ می‌دهد، پرداخته‌اند. آن‌ها از سزیم ^{137}Cs و ید ^{131}I به‌عنوان ذرات پرتوزا نحوه پراکنش و حمل‌ونقل آن‌ها را مورد بررسی و لایه‌هایی از اتمسفر که غلظت‌های این دو را بیش از سایر لایه‌ها نشان می‌دهد را مشخص کردند [۸]. فام و همکاران (۲۰۱۳)، نهشت خشک و مرطوب از بریلیوم ^{7}Be ، سرب ^{210}Pb و سزیم ^{137}Cs در فرانسه را در طول یک دوره با در نظر گرفتن تغییرات فصلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تغییرات زمانی غلظت بریلیوم ^{7}Be ، سرب ^{210}Pb و سزیم ^{137}Cs در طول فصولی از سال متفاوت است. این تغییرات برای بریلیوم ^{7}Be و سرب ^{210}Pb در فصل پاییز بیشتر از فصل بهار و برای فصل زمستان کمتر از فصل بهار و برای فصل تابستان میزان غلظت پایین‌تر از تمام فصول بوده و برای سزیم ^{137}Cs در فصل بهار بیشتر از فصل پاییز و در فصل

بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت سالانه در سراسر جهان حدود هفت میلیون نفر بر اثر بیماری‌های منتسب به آلودگی هوای، جان خود را از دست می‌دهند [۱]. همچنین بر اساس گزارش مؤسسه بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) در سازمان جهانی بهداشت در سال ۲۰۱۳، آلودگی هوا به‌ویژه ذرات معلق به‌عنوان ترکیبات سرطان‌زا برای انسان (گروه یک) طبقه‌بندی شده است [۲]. در بسیاری از شهرهای بزرگ کشور، از جمله تهران، کرج، اصفهان، مشهد، تبریز، اراک، اهواز و شیراز، در اغلب روزها غلظت برخی از آلاینده‌های هوا از استانداردهای ملی به‌مراتب بیشتر است و برآورد می‌شود که با احتساب پدیده ریزگردها، جمعیتی بالغ بر ۳۵ میلیون نفر، یعنی حدود کمی کمتر از نیمی از جمعیت کل کشور در معرض درجاتی از آلودگی هوا قرار داشته باشند. این مشکل نه تنها سلامت مردم را به مخاطره می‌اندازد، بلکه هزینه‌های بالایی را نیز بر حوزه سلامت تحمیل می‌کند؛ آن‌هم به دلیل افزایش نیاز به خدمات مراقبتی و بهداشتی و انجام فوریت‌های پزشکی که برای جمعیت تحت تأثیر انجام می‌شود [۳].

بر اساس آمار منتشرشده از سوی سازمان بهداشت جهانی سلامت بسیاری از افراد جامعه در معرض خطر جدی قرار گرفته و بسیاری از بیماری‌های غیر واگیردار به آلودگی هوا وابستگی مستقیم یا غیرمستقیم دارند [۴]. در نتیجه خطر مرگ زودرس، سلامت بسیاری را تهدید می‌کند. تنها در شهر تهران، بیش از یک‌سوم روزهای سال، شرایط هوا در حالت ناسالم گزارش می‌شود [۵]. از منظر مواجهه، متوسط غلظت سالانه تعدادی از آلاینده‌های مهم همچون O_3 ، CO ، SO_2 و $\text{PM}_{2.5}$ در تهران، همواره در حد ناسالم است و چندین برابر حدود توصیه‌شده سازمان بهداشت جهانی گزارش می‌شود [۵].

استفاده از ذرات پرتوزای طبیعی به‌عنوان ردیاب‌های محیطی برای مطالعه آلاینده‌های اتمسفری یکی از مطالعات کلیدی و مهم در انجام تحقیقات اتمسفری است. شاید یکی از مهم‌ترین مباحث مربوط به اتفاقاتی همچون انتشار ذرات هسته‌ای، میزان ماندگاری و پخش‌شدگی ذرات در اتمسفر منطقه است. اینکه ذرات بعد از خروج از منبع تولید تا چه میزان در اتمسفر معلق خواهند بود، یکی از پژوهش‌های حساس و فناوری‌های پیچیده است. این فناوری امکان پیش‌بینی میزان ماندگاری ذرات را در اتمسفر منطقه خواهد داد. پیشتر بر اساس بررسی میزان دوز ذرات پرتوزا در اتمسفر منطقه مورد نظر، تصمیمات مقطعی گرفته می‌شود. اما با اطلاع از میزان ماندگاری ذرات اتمسفری در یک منطقه، شرایط انتشار آلاینده‌های پرتوزا را می‌توان پیش‌بینی و اقدامات بعدی را بهینه‌تر اجرا نمود. شهر تهران با توجه به دلایل متعدد از جمله جمعیت، ویژگی‌های جغرافیایی و همچنین داشتن راکتور

البته در خصوص محصول واپاشی ذرات رادیواکتیو در فعالیت‌های هسته‌ای نیز مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته و با توجه به فعالیت‌های هسته‌ای نظامی و غیرنظامی و همچنین اتفاقات پیش‌بینی‌نشده در انفجارات مراکز هسته‌ای نیاز به تحقیق و بررسی در این زمینه بیش از پیش احساس می‌شود [۱۴]. اورا و همکاران (۲۰۱۵)، به جمع‌آوری ذرات معلق در شرق ژاپن پرداخته و سزیم ۱۳۴ و سزیم ۱۳۷ را به‌صورت ساعتی با روش حجم بالا نمونه‌برداری کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان از بالا بودن غلظت این ذرات در اتمسفر دارد، که منشاء آن‌ها را با حادثه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ مرتبط می‌دانند [۱۵].

علی (۲۰۱۶)، به بررسی مواد پرتوزای مؤثر بر سلامت انسان در اتمسفر نقاط مختلف کشور مصر پرداخته و از محصولات رادون و تورون به‌عنوان دو ذره پرتوزای مهم که استنشاق آن‌ها بر ریه تأثیرات مخربی دارد، استفاده کرده است [۱۶].

در پژوهشی دیگر لوزانو و همکاران (۲۰۱۱)، غلظت بیسموت ۲۱۰ و سرب ۲۱۰ در اتمسفر را مورد ارزیابی قرار داده و زمان اقامت ذرات اتمسفری را براساس نسبت سرب ۲۱۰/پلونیوم ۲۱۰ محاسبه کردند. آن‌ها برای محاسبه زمان اقامت از محصولات رادون ۲۲۲ استفاده کردند. زمان اقامت به‌دست‌آمده برای نسبت سرب ۲۱۰/بیسموت ۲۱۰ به‌طور مداوم از زمان اقامت سرب ۲۱۰/پلونیوم ۲۱۰ کمتر بود. این موضوع به منابع غیر اصلی پلونیوم ۲۱۰ و همچنین فروپاشی بیسموت ۲۱۰ نسبت داده شد. از این رو آن‌ها متوجه شدند که برای به دست آوردن زمان دقیق اقامت می‌بایست غلظت بیسموت ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ به‌طور دقیق اندازه‌گیری و نسبت بین سرب ۲۱۰/بیسموت ۲۱۰ بیشتر از نسبت سرب ۲۱۰/پلونیوم ۲۱۰ مورد توجه قرار گیرد [۱۷].

گروندلا و پورستندروف (۲۰۰۴)، به بررسی تفاوت‌های توزیع اندازه فعالیت‌های ذرات پرتوزای معلق در هوا پرداخته‌اند. آن‌ها از توزیع رادیونوکلئیدهای پلونیوم ۲۱۸ و پلونیوم ۲۱۴/بیسموت ۲۱۴ با فعالیت‌های کوتاه‌مدت و سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ حاصل از واپاشی رادون و سرب ۲۱۲، پلونیوم ۲۱۲ و بریلیوم ۷ حاصل از واپاشی تورون اتمسفر استفاده کردند. نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد که علت اصلی توزیع این دودسته از ذرات پرتوزا ترکیب آن‌ها با ذرات معلق اتمسفر بوده است [۱۸]. کراوفورد و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از رادون در اتمسفر شهر ریچموند استرالیا ثبات ذرات معلق را ارزیابی و این موضوع را به‌صورت محلی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان از وجود یک پایداری در غلظت ذرات معلق در طول شب و یک‌روند فزاینده در میزان غلظت در طول روز حکایت داشت. آن‌ها وجود وارونگی دمای در طول شب را عامل این شرایط دانستند [۱۹].

مالا و همکاران (۲۰۱۶)، توزیع اندازه ذرات اتمسفری

تابستان کمتر از فصل پاییز و در نهایت برای فصل زمستان در پایین‌ترین سطح بود. به‌طور کلی میزان نهشت بریلیوم ۷، سرب ۲۱۰ و سزیم ۱۳۷ در طول تابستان بیشتر بود و نسبت فعالیت سرب ۲۱۰/بریلیوم ۷ در طول زمستان و پاییز بالاتر از تابستان و بهار بود [۹].

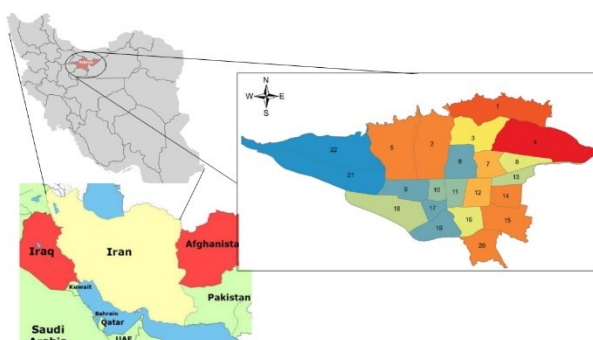
مالا و همکاران (۲۰۱۵)، توزیع اندازه ذرات معلق در هوا بعد از حوادث چرنوبیل و فوکوشیما را مورد بررسی قرار داده و در چند نقطه از کشور جمهوری چک نمونه‌برداری کردند. آن‌ها ذراتی همچون ^{137}Cs ، ^{134}Cs ، ^{131}I و ^7Be را در نمونه‌ها اندازه‌گیری کردند. نتایج کار آن‌ها از وجود غلظت ۳ برابری برخی از ذرات همچون ^{95}Nb ، ^{95}Zr ، ^{144}Ce ، ^{141}Ce ، ^{140}La و ^{140}Ba در نمونه‌ها نسبت به ذراتی همچون ^{132}Te ، ^{131}I ، ^{106}Ru ، ^{103}Ru ، ^{137}Cs و ^{134}Cs حکایت دارد. همچنین ذراتی همچون ^{106}Ru ، ^{103}Ru ، ^{137}Cs و ^{134}Cs در حادثه فوکوشیما بیشتر بوده است [۱۰].

ایندرا و همکاران (۲۰۱۶)، ترکیب و منشاء سرب رادیواکتیو در اتمسفر شهرهای صنعتی هند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در شهر صنعتی کانپور هند با جمع‌آوری ذرات معلق در هوا به ارزیابی آن‌ها پرداختند و با ردیابی و شناسایی منشاء و ترکیب سرب نمونه‌ها، توانستند مقدار سرب تولیدشده با منشاء فعالیت‌های انسانی و منابع طبیعی را تفکیک کنند. آن‌ها پیش‌تر منشاء سرب را سوختن بنزین توسط وسایل نقلیه عنوان کرده بودند. از این رو این تحقیق در خصوص تعیین غلظت سرب تولیدی توسط منابع مختلف انجام شد.

یوانیدو و پاتروب (۲۰۱۴)، توزیع اندازه قطر آئروئودینامیکی و زمان اقامت ذرات معلق اتمسفر را واقع در مرکز تحقیقات قطبی در فنلاند مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها مشخص کرد که محدوده اندازه قطر آئروئودینامیکی بریلیوم ۷ بین ۰/۵۴ تا ۱/۰۵ میکرومتر (به‌طور متوسط ۰/۸۳ میکرومتر) بوده و مدت زمان اقامت برای این ذرات در اتمسفر در حدود ۸ روز تخمین زده شد. آن‌ها تراکم بالای رطوبت نسبی را در بالا بودن غلظت ذرات مرتبط می‌دانند. آن‌ها در گزارش خود بین اندازه قطر ذرات و غلظت بریلیوم ۷ همبستگی معناداری را گزارش کردند ولی بین نرخ حذف ذرات ارتباط چندانی را عنوان نکردند [۱۱].

راپوتا (۲۰۱۳)، در پی حادثه فوکوشیما با بررسی غلظت ذرات معلق در ارتفاع و سطوح مختلف و مسیر انتقال آن‌ها به طراحی مدلی جهت شبیه‌سازی انتقال و پراکنش این ذرات پرداخته‌اند [۱۲]. گونز و همکاران (۲۰۱۴)، به بررسی نهشت خشک و مرطوب و ذرات پرتوزا از اتمسفر پرداخته و از دو ذره سزیم ۱۳۴ و سزیم ۱۳۷ با اندازه‌گیری غلظت آن‌ها در اتمسفر و سطح زمین در ۸۰ کیلومتری سایت فوکوشیما به دو مقدار که تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها بود، دست یافتند [۱۳].

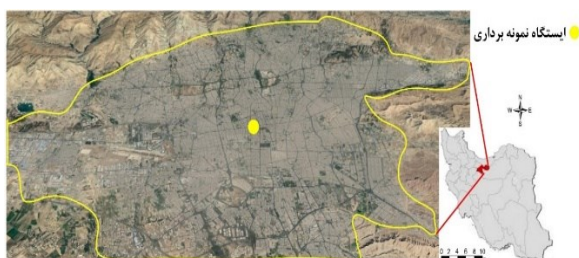
۷۳۰ کیلومترمربع از شمال به ارتفاعات البرز، از سمت شرق به کوه‌های محدوده بی‌بی‌شهربانو و از جنوب به حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران ختم می‌شود [۲۵]. در شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی شهر تهران مشاهده می‌شود. احاطه شدن تهران از سمت شمال و شمال شرق توسط ارتفاعات، مانع از عبور بادهایی که از سمت غرب و جنوب می‌وزند، شده و باعث انباشتگی آلاینده‌ها بر روی سطح منطقه می‌گردد؛ در نتیجه پتانسیل آلودگی هوا در مرکز شهر را افزایش می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲-۲- نمونه‌برداری

دسترسی آسان و سریع به آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری، منبع برق و ایستگاه پایش پارامترهای محیطی از شاخصه‌های ایستگاه نمونه‌برداری است [۲۶]. ایستگاه نمونه‌برداری از کل ذرات معلق توسط نمونه‌بردار حجم بالا (High Volume) در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین صورت گرفت. با توجه شرایط موجود، مدت‌زمان نمونه‌برداری برای ۶ تا ۱۲ ساعت با جریان هوای متوسط ۱٫۵ مترمکعب بر دقیقه در نظر گرفته شد. شکل (۲)، موقعیت جغرافیایی ایستگاه نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. همچنین از فیلترهای با جنس الیاف شیشه‌ای (فایبرگلاس) در ابعاد ۲۰ در ۲۵ سانتیمتر با بازدهی ۹۹/۹۹ درصدی جهت نمونه‌برداری استفاده شد. فیلترها قبل و بعد از انجام نمونه‌برداری در آون خشک و با ترازوی دقیق وزن شدند. اختلاف وزن فیلترها قبل و بعد از نمونه‌برداری مقدار نمونه جمع‌آوری شده را نشان خواهد داد. با داشتن حجم هوای عبوری و مقدار نمونه خشک جمع‌آوری شده می‌توان غلظت ذرات معلق در منطقه را برحسب جرم به حجم محاسبه کرد [۲۶].



شکل (۲): موقعیت ایستگاه نمونه‌برداری واقع در منطقه امیرآباد

تولیدشده در معادن اورانیوم را در اتمسفر در منطقه‌ای در جمهوری چک بررسی نموده و از ۱۳ نقطه با روش آبخاری نمونه‌برداری شد. نتایج حاصل نشان از مشابه بودن توزیع اندازه در نقاط نمونه‌برداری داشت. بیشترین فراوانی در ذرات با قطر ۰٫۵ میکرومتر بوده و بیشتر توزیع اندازه قطر آئرودینامیکی ذرات به ترتیب بین ۵/۳ و ۱۰/۵ میکرومتر و انحراف از استاندارد نیز به ترتیب بین ۸/۲ و ۰٫۵ میکرومتر بود [۲۰].

سو و همکاران (۲۰۱۷)، غلظت پلونیوم ۲۱۰ در ذرات اتمسفری را اندازه‌گیری کردند. آنها غلظت این رادیونوکلئید را در غلظت کل ذرات معلق ۰/۱ تا ۰/۲ و با میانگین ۰/۰۸ میلی بکرل بر مترمکعب عنوان کردند. تغییر غلظت این رادیونوکلئید نسبت به پارامترهای محیطی و همچنین تعیین منشأ از اهداف بررسی آنها بود [۲۱].

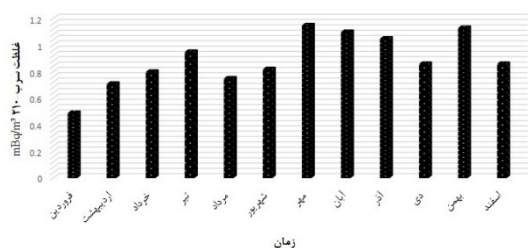
اویانگ و همکارانش (۲۰۱۷)، از برخی رادیونوکلئیدهای اتمسفری مانند سزیم و اورانیوم برای ردیابی آلودگی هوا استفاده کرده‌اند. به طوریکه این نوکلئیدها جهت سنجش دوز کشندگی در آلاینده‌های اتمسفری کاربرد دارد [۲۲]. در پژوهشی مشابه این پژوهشگران در سال ۲۰۱۸، با بررسی ذرات معلق حاصل از احتراق زغال سنگ به ردیابی پلونیوم ۲۱۰ پرداخته و در اتمسفر شهر پکن تغییرات فصلی این عنصر را در طول سال رصد کرده‌اند. این بررسی در نیروگاه‌های که اساس کار آنها با سوخت زغال سنگ است، صورت گرفت. آنها مقدار انتشار پلونیوم ۲۱۰ را ۱/۱۵ میلی بکرل بر مترمکعب عنوان کردند [۲۳].

طی تحقیقی در شهر لودز؛ دلگوز (۲۰۱۵)، عنوان کردند که بالاترین مقدار سرب ۲۱۰ مربوط به نمونه‌های برداشتی در فصل زمستان است. آنها فراوانی سرب ۲۱۰ در فصل سرد سال را به استفاده از منابع و سیستم گرمایشی و همچنین نیروگاه‌های زغال سنگی مرتبط دانستند [۲۴].

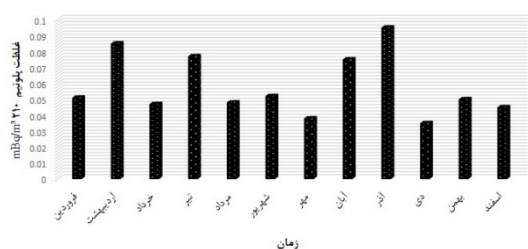
۲- روش تحقیق

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

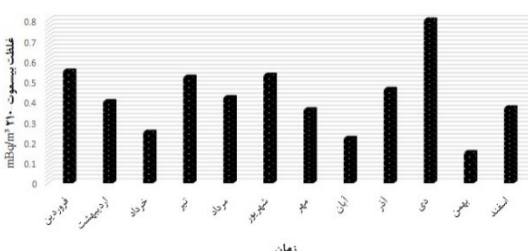
استان تهران با وسعتی حدود ۱۳/۶۸۸ کیلومتر مربع در شمال ایران و در جنوب بخش مرکزی رشته کوه البرز قرار دارد. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب‌غربی به استان مرکزی، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود می‌شود. شهر تهران بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران، مرکز این استان است. استان تهران که صنعتی‌ترین استان ایران است، از لحاظ تولید ناخالص داخلی در رتبه ۱ کشوری قرار دارد. همچنین سهم تولید ناخالص بخش کشاورزی ۱، صنعت ۲۲ و خدمات ۷۷ درصد بوده‌است. استان تهران همچنین مرکز تلاقی راه‌های ارتباطی ایران (خطوط راه‌آهن، جاده ای و هوایی) است. شهر تهران با وسعتی حدود



شکل (۳): میانگین غلظت ماهیانه سرب ۲۱۰ در دوره بررسی



شکل (۴): میانگین غلظت ماهیانه پلونیوم ۲۱۰ در دوره بررسی



شکل (۵): میانگین غلظت ماهیانه بیسموت ۲۱۰ در دوره بررسی

یک روش برای تخمین زمان اقامت ذرات معلق اتمسفری حاوی رادیونوکلیدهای محصول واپاشی رادن بر مبنای پرتوزایی یک جفت رادیوایزوبار همراه ژنتیکی مانند سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰ یا سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰، مطابق با فروپاشی‌های متوالی در روند واپاشی بتا به شکل زیر می‌باشد [۲۷]:

(پایدار)سرب ۲۰۶ → پلونیوم ۲۱۰ → بیسموت ۲۱۰ → سرب ۲۱۰

که بر اساس آن زمان اقامت، τ_R ، بوسیله معادله شماره (۱) تعریف می‌شود.

$$\tau_R = \frac{1}{\lambda_{Bi}} \cdot \frac{\lambda_{Bi} \cdot N_{Bi}}{\lambda_{Pb} \cdot N_{Pb} - \lambda_{Bi} \cdot N_{Bi}} \quad (1)$$

که در آن $\lambda_{Bi} \cdot N_{Bi}$ پرتوزایی بیسموت ۲۱۰ و $\lambda_{Pb} \cdot N_{Pb}$ پرتوزایی سرب ۲۱۰ در هوا و $\lambda_{Bi} = 0.138 \text{ d}^{-1}$ ثابت واپاشی بیسموت ۲۱۰ است [۲۷].

با توجه به اینکه غلظت ذرات معلق پرتوزا در اتمسفر خیلی کم و در حد میکروگرم بر مترمکعب است، آنالیز و شمارش آن‌ها مستلزم این است که حجم وسیعی از هوا را از بستر غشائی یا همان فیلتر عبور داده و از نظر وزنی بخش قابل‌توجهی از ذرات معلق را بتوانیم جهت آنالیز جمع‌آوری نماییم. این کار به روش فعال و استفاده از پمپ‌ها قوی حجم بالا صورت خواهد گرفت [۲۷]. در این پژوهش جهت نمونه‌برداری از کل ذرات معلق اتمسفری^۱ از نمونه‌بردار حجم بالای هوا در مدت‌زمان‌های متفاوت ۶ الی ۱۲ ساعت استفاده شد. قبل از استفاده از فیلترها باید جهت گرفتن رطوبت، آن‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در حرارت 10.5°C در آون قرار داده و جهت نصب روی دستگاه آماده می‌کنیم. پس از نمونه‌برداری مجدداً فیلتر در کوره 10.5°C برای ۲۴ ساعت رطوبت خود را از دست می‌دهد و به‌روش قبل توزین می‌شود [۲۸]. اختلاف وزن اولیه و ثانویه فیلتر، میزان ذرات معلق جمع‌آوری‌شده را نشان می‌دهد [۲۹].

۳- نتایج و بحث

با توجه به تعداد نمونه‌های برداشت شده برای هر فصل، بین دو تا سه نمونه در هر ماه مورد آنالیز و میانگین نتایج هر ماه ارائه شده است. میانگین غلظت ماهیانه سرب-۲۱۰ برای کل دوره بررسی، در شکل (۳) ارائه‌شده است. بر اساس این نتایج، بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده برای سرب ۲۱۰ در مهرماه با 1.1 mBq/m^3 بود. متوسط غلظت برای این پارامتر در حدود 0.8 mBq/m^3 بود که کمترین مقدار آن در فروردین‌ماه دوره بررسی با 0.5 mBq/m^3 ثبت شد. نتایج نشان از افزایش نسبی در غلظت این متغیر برای فروردین و اردیبهشت‌ماه و کاهش نسبی برای شهریور و دی‌ماه دارد. میانگین غلظت پلونیوم ۲۱۰ برای کل دوره در حدود 0.058 mBq/m^3 بود. این در حالی است که مقدار 0.095 mBq/m^3 در آذرماه و 0.032 mBq/m^3 در دی‌ماه به ترتیب به‌عنوان بیشترین و کمترین غلظت اندازه‌گیری شده برای این رادیونوکلید بود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پلونیوم ۲۱۰ برای کل دوره بررسی در شکل (۴) ارائه‌شده است. همین روند برای بیسموت ۲۱۰ نیز با میانگین کلی 0.42 mBq/m^3 برای دوره بررسی مشاهده شد. بیشترین و کمترین مقدار اندازه‌گیری شده برای این رادیونوکلید در کل دوره مورد بررسی به‌ترتیب 0.75 mBq/m^3 و 0.18 mBq/m^3 بود. نتایج میانگین غلظت ماهیانه برای نوکلید پرتوزای بیسموت ۲۱۰ در شکل (۵) نشان داده‌شده است.

^۱ Particulate Matter

۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ را نشان می‌دهد.

جدول (۲): زمان اقامت ذرات پرتوزا بر اساس نسبت سرب ۲۱۰/پلونیوم ۲۱۰.

| زمان ماندگاری (روز) | زمان |
|---------------------|----------|
| ۲۱/۵ | فروردین |
| ۱۹/۴ | اردیبهشت |
| ۱۷/۸ | خرداد |
| ۲۲/۵ | تیر |
| ۲۰/۶ | مرداد |
| ۱۹/۷ | شهریور |
| ۲۱/۴ | مهر |
| ۱۹/۵ | آبان |
| ۱۸/۷ | آذر |
| ۱۷/۸ | دی |
| ۲۰/۴ | بهمن |
| ۲۲/۳ | اسفند |

در تحقیقی، باسکاران و شاو (۲۰۰۱) بر مبنای نسبت پرتوزایی سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰، زمان اقامت ذرات منطقه قطب شمال را بین ۱۲ تا ۳۲ روز از ۲ نمونه اندازه‌گیری انجام شده تخمین زدند [۳۱]. همچنین لهما و سیتکوس (۱۹۵۹) زمان اقامت ذرات را بر مبنای نسبت پرتوزایی سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ در اتمسفر فریبرگ آلمان ۲۰ روز تخمین زدند [۳۲]. در حالی که پیرسون و همکاران (۱۹۶۶) زمان اقامت ذرات را بر همین مبنای دوازده روز ۴۰ روز تخمین زدند [۳۳].

پاپاستفانو و بوندتی (۱۹۹۱) زمان ماندگاری ذرات در اتمسفر را بر مبنای سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰ با تعداد ۲۱ نمونه اندازه‌گیری شده طی یک دوره یکساله در اکریج تنسی^۱ واقع در عرض‌های معتدله با بارندگی زیاد (آب و هوای مرطوب) ۴/۸ تا ۱۵/۳ روز (متوسط ۸/۲ روز) تخمین زدند [۳۴]. در پژوهش دیگری، پوت و همکاران (۱۹۷۲) محدوده زمان اقامت را ۱/۵۹ تا ۱۳ روز (متوسط ۵/۴ روز) بر مبنای نسبت پرتوزایی بر مبنای سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰ و از ۱۱ تا ۷۷ روز (متوسط ۲۴ روز) بر مبنای نسبت پرتوزایی بر مبنای سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ با انجام ۲۰ نمونه‌برداری در هوای سطحی در طول یک دوره ۴/۵ ساله در منطقه بولدر کلرادو تخمین زدند [۳۵].

فرانسیس و همکاران (۱۹۷۰) در طول یک دوره سه ماهه در

چنانچه پرتوزایی پلونیوم ۲۱۰، در هوا $\lambda_{Po} N_{Po}$ مد نظر قرار گیرد و ثابت واپاشی پلونیوم ۲۱۰ برابر $\lambda_{Po} = 5.0 \times 10^{-3} d^{-1}$ است، آنگاه نسبت پرتوزایی پلونیوم ۲۱۰ و سرب ۲۱۰ بوسیله معادله شماره ۲ زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$\frac{\lambda_{Po} \cdot N_{Po}}{\lambda_{Pb} \cdot N_{Pb}} = \frac{\tau_R^2}{\left(\tau_R + \frac{1}{\lambda_{Bi}}\right) \left(\tau_R + \frac{1}{\lambda_{Po}}\right)} \quad (2)$$

جدول (۱) میانگین ماهیانه زمان اقامت نوکلیدهای پرتوزا را بر مبنای سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰ را نشان می‌دهد. براساس این نتایج میانگین زمان اقامت ذرات اتمسفری بر مبنای سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰ در ایستگاه نمونه‌برداری ۱۰/۵ روز تخمین زده شد. این درحالی است که بیشترین و کمترین مدت زمان اقامت این ذرات به ترتیب ۲۱/۵ و ۷/۲ روز بود. باتوجه به میانگین ماهیانه زمان اقامت، دی‌ماه و اسفندماه به ترتیب به‌عنوان بیشترین و کمترین تخمین زده شد.

جدول (۱): زمان اقامت ذرات پرتوزا بر اساس نسبت سرب ۲۱۰/بیسموت ۲۱۰

| زمان ماندگاری (روز) | زمان |
|---------------------|----------|
| ۹/۵ | فروردین |
| ۷/۷۵ | اردیبهشت |
| ۷/۸ | خرداد |
| ۸/۱ | تیر |
| ۱۲/۵ | مرداد |
| ۱۱/۶ | شهریور |
| ۱۲/۴ | مهر |
| ۷/۲۳ | آبان |
| ۸/۱ | آذر |
| ۲۱/۵۶ | دی |
| ۱۱/۳ | بهمن |
| ۷/۸۵ | اسفند |

جهت تخمین زمان اقامت ذرات بر اساس نسبت پرتوزایی سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰، مور و همکاران (۱۹۷۲) این مقدار را بین ۰/۰۵۴ تا ۰/۰۹۲ در نظر گرفتند [۳۰]. نسبت پرتوزایی سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ در این تحقیق بین ۰/۰۵۵ تا ۰/۰۷۹ محاسبه شد. طبق این نتایج میانگین زمان اقامت ذرات معلق ۲۰/۱ روز تخمین زده شد. بر این اساس تیرماه با میانگین ۲۲/۵ روز و دی‌ماه ۱۷/۸ روز به‌عنوان بیشترین و کمترین زمان اقامت اندازه‌گیری شده در این کار پژوهشی تخمین زده شد. جدول (۲)، نتایج حاصل از بررسی زمان اقامت ذرات بر مبنای نسبت سرب

¹ Oak Ridge, Tennessee

حاکم در منطقه و همچنین نتایج مربوط به میزان ماندگاری ذرات اتمسفری، در صورت بروز هرگونه حوادث هسته‌ای، تهدیدات نظامی و یا نشت ذرات رادیواکتیو در راکتور تحقیقاتی تهران، میزان در تماس بودن آلاینده‌های اتمسفری در سطح شهر تهران تا چه مدتی خواهد بود. با این استدلال می‌توان در موضوع مدیریت بحران احتمالی بهترین تصمیم را اتخاذ نمود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش؛ انتشار آلاینده‌های پرتوی در ماه‌های همچون دی و مرداد میزان تأثیر انسانی بیشتری را می‌تواند در منطقه داشته باشد. این درحالی است که وجود این رویداد در ماه‌های تیر و آذر در دراز مدت تأثیر کمتری را خواهد داشت.

۵- مراجع

- [1] WHO 2014. Burden of disease from ambient and household air pollution.
- [2] D. Loomis, Y. Grosse, B. Lauby-Secretan, F. El Ghissassi, V. Bouvard, L. Benbrahim-Tallaa, N. Guha, R. Baan, H. Mattock, and K. Straif, "The carcinogenicity of outdoor air pollution," *The lancet oncology*, vol. 14(13), pp. 1262-1263, 2013.
- [3] K. M. Nadafi and M. Natiqpour, "Examining Jurjani's point of view on air pollution and water purification in the book of Kharazmshahi's storage," *Journal of Medical Ethics and History*, vol. 3, pp. 28-20, 2010. (In Persian)
- [4] WHO., "Ambient (outdoor) air quality and health," 2015. Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- [5] Air Quality Control Company 2019. Annual Report of Tehran Air Quality in 2016: QM97/02/01(U) May 2017 (In Persian)
- [6] K. Ram and M. M. Sarin, "Atmospheric 210Pb, 210Po and 210Po/210Pb activity ratio in urban aerosols: temporal variability and impact of biomass burning emission," *International meteorological institute in Stockholm*, 17513, 2012.
- [7] Longbo et al., "Monitoring of atmospheric radionuclides from the Fukushima nuclear accident and assessing their impact on Xi'an, China," *Atmospheric Science*, vol. 58, no. 13, pp. 1585-1591, 2013.
- [8] T. Christoudias, Y. Proestos, and J. Lelieveld, "Atmospheric Dispersion of Radioactivity from Nuclear Power Plant Accidents: Global Assessment and Case Study for the Eastern Mediterranean and Middle East," *Energies*, vol. 7, pp. 8338-8354, 2014.
- [9] M. Pham, P. Povinec, H. Nies, and H. Betti, "Dry and wet deposition of 7Be, 210Pb and 137Cs in Monaco air during 1998-2010: Seasonal variations of deposition fluxes," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 120, pp. 45-57, 2013.
- [10] H. Malá, P. Rulík, V. Bečková, J. Mihalík, and M. Slezáková, "Particle size distribution of radioactive aerosols after the Fukushima and the Chernobyl accidents [2013]," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 126, pp. 92-98, 2015.
- [11] A. Ioannidou and J. Paatero, "Activity size distribution and residence time of 7Be aerosols in the Arctic atmosphere," *Atmospheric Environment*, vol. 88, pp. 99-106, 2014.
- [12] W. F. Raputa, "Numerical analysis of aerosol radionuclide fall-outs from accident outbursts into the atmosphere," *Bull. Comp. Center.*, pp. 1-8, Nov. 2013.
- [13] M. Gonze, P. Renaud, I. Korsakissok, H. Kato, T. G. Hinton, C. Murlon, and M. Simon-Cornu, "Sessment of Dry and Wet Atmospheric Deposits of Radioactive Aerosols: Application to Fukushima Radiocaesium Fallout," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48(19), pp. 11268-11276, 2014.
- [14] M. Kurdi and M. Saadati, "Nuclear defense and its effect on reducing contamination of radioactive substances in farm animals and livestock products," *Passive defense magazine*, vol. 12(1), pp. 21-34, 2022. (In Persian)

مادیسون ۱ میانگین زمان اقامت ذرات اتمسفری را ۹/۶ روز بر مبنای نسبت‌های پرتوزایی سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ برای ذرات بزرگتر از ۰/۲۲ میکرومتر تخمین زدند [۳۶]. مارلی و همکاران (۲۰۰۰) زمان اقامت را برای هفت نمونه جمع شده در ایالت ایلینویز در طول یک دوره دو ساله، ۳ نمونه جمع شده در ایالت آریزونا، یک نمونه جمع شده در ایالت نیومکزیکو و ۵ نمونه جمع شده در مکزیک تخمین زدند. آنها زمان اقامت ذرات را بر مبنای نسبت سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰، ۶۷ - ۶ روز و بر مبنای نسبت سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ - ۶۶ - ۳۳ روز تخمین زدند [۳۷]. نتایج این تحقیقات با نتایج حاصل از این تحقیق هم‌راستا بوده و اختلاف معناداری در گستره نتایج به چشم نمی‌خورد، هرچند با توجه به ماهیت کار و وابستگی به متغیرهای محیطی، وجود تفاوت در نتایج امری اجتناب ناپذیر است. در تحقیق حاضر، مقادیر میانگین زمان اقامت برای کل ذرات معلق (PM) بر مبنای نسبت پرتوزایی سرب ۲۱۰ و بیسموت ۲۱۰ برابر ۲۱/۵۶ - ۷/۲۳ روز و بر مبنای نسبت پرتوزایی سرب ۲۱۰ و پلونیوم ۲۱۰ برابر ۱۷/۸ - ۲۲/۵ روز تخمین زده شد.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده برای سرب ۲۱۰ در مهرماه با $1/15 \text{ mBq/m}^3$ بود. میانگین کل دوره برای این رادیونوکلئید در حدود $0/88 \text{ mBq/m}^3$ اندازه‌گیری شد که کمترین مقدار آن در فروردین‌ماه در حدود $0/49 \text{ mBq/m}^3$ بود. میانگین غلظت اندازه‌گیری شده برای پلونیوم ۲۱۰ در کل دوره بررسی در حدود $0/058 \text{ mBq/m}^3$ بود؛ که بیشترین غلظت آن با مقدار $0/095 \text{ mBq/m}^3$ در آذرماه و کمترین غلظت اندازه‌گیری شده برای این رادیونوکلئید با مقدار $0/035 \text{ mBq/m}^3$ در دی‌ماه به ثبت رسید. همین روند برای بیسموت ۲۱۰ نیز با میانگین کلی $0/41 \text{ mBq/m}^3$ در دوره بررسی مشاهده شد. بیشترین و کمترین مقدار محاسبه‌شده برای این رادیونوکلئید در کل دوره بررسی به ترتیب $0/8$ و $0/15 \text{ mBq/m}^3$ بود.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از محاسبه‌ی میانگین زمان اقامت ذرات اتمسفری بر مبنای سرب ۲۱۰/بیسموت ۲۱۰؛ مدت زمان ۱۰/۴۶ روز برای ماندگاری این ذرات در جو تخمین زده شد. این درحالی است که بیشترین و کمترین مدت زمان اقامت این ذرات به ترتیب ۲۱/۵۶ و ۷/۲۳ روز بود. همچنین میانگین مدت زمان اقامت ذرات اتمسفری بر مبنای سرب ۲۱۰/پلونیوم ۲۱۰، ۲۰/۱۴ روز تخمین زده شد. با توجه به شرایط اقلیمی

¹ Madison, Wisconsin

Organization of Iran, 2004. (In Persian)

- [26] B. Oroji, "Risk assessment radioactive aerosols with determination residence times in the atmosphere's Tehran," Iran, Ph.D. Thesis. Malayer University, p. 246, 2019.
- [27] C. Papastefanou, "Radioactive Aerosols," ELSEVIER. 187 p. 2008.
- [28] C. Papastefanou, "Beryllium-7 Aerosols in Ambient Air," Papastefanou, Aerosol and Air Quality Research, vol. 9(2), pp. 187-197, 2009.
- [29] C. Papastefanou, "Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides," Applied Radiation and Isotopes, vol. 64(1), pp. 93-100, 2006.
- [30] H. E. Moore, S. E. Poet, and E. A. Martell, "Tropospheric aerosol residence times indicated by radon and radondaughter concentrations," In: Adams, J.A.S., Lowder, W.M., Gessel, T.F. (Eds.), Natural Radiation Environment II. Technical Information Center/U.S. Department of Energy, Washington, DC, CONF-720805-P2, pp. 775-786, 1972.
- [31] M. Baskaran and G. E. Shaw, "Residence time of arctic haze aerosols using the concentrations and activity ratios of ^{210}Po , ^{210}Pb and ^7Be ," Journal of Aerosol Science, vol. 32(4), pp. 443-452, 2001.
- [32] L. Lehmann and A. Sittkus, "Bestimmung von Aerosolverweilzeiten aus den RaD und RaF Gehalt der atmosphärischen Luft und des Niederschlages," Naturwissenschaft, vol. 46, pp. 9-10, 1959.
- [33] D. H. Peirson, R. S. Cambray, and G. S. Spicer, "Lead-210 and polonium-210 in the atmosphere," Tellus 18, pp. 427-433, 1966.
- [34] C. Papastefanou and E. A. Bondietti, "Mean residence times of atmospheric aerosols in the boundary layer as determined from $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$ activity ratios," J. Aerosol Sci., vol. 22, pp. 927-931, 1991.
- [35] S. E. Poet, H. E. Moore, and E. A. Martell, "Lead-210, bismuth-210 and polonium-210 in the atmosphere: Accurate ratio measurement and application to aerosol residence time determination," J. Geophys. Res., vol. 77(33), pp. 6515-6527, 1972.
- [36] C. W. Francis, G. Chesters, and L. A. Haskin, "Determination of ^{210}Pb mean residence time in the atmosphere," Environ. Sci. Technol., vol. 4 (7), pp. 586-589, 1970.
- [37] N. A. Marley, O. S. Gaffney, P. J. Drayton, M. M. Cunningham, K. A. Orlandini, and R. Paode, "Measurement of ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{210}Bi in size-fractionated atmospheric aerosols: An estimate of fine-aerosol residence times," Aerosol Sci. Technol., vol. 32, pp. 569-583, 2000.
- [15] Y. Oura, M. Ebihara, H. Tsuruta, T. Nakajima, T. Ohara, M. Ishimoto, H. Sawahata, Y. Katsumura, and W. Nittae, "A Database of Hourly Atmospheric Concentrations of Radiocesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) in Suspended Particulate Matter Collected in March 2011 at 99 Air Pollution Monitoring Stations in Eastern Japan," Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, vol. 15(2), pp. 1-12, 2015.
- [16] A. E. Ali, "Studies on the effect of atmospheric radioactive materials on human being in different places of Egypt," International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences ISSN (E), 2321-8851; ISSN (P): 2347-4580, vol. 4(3), pp. 63-66, 2016.
- [17] R. L. Lozano, E. G. San Miguel, and J. P. Bolivar, "Assessment of the influence of in situ ^{210}Bi in the calculation of in situ ^{210}Po in air aerosols: Implications on residence time calculations using $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ activity ratios," Journal of Geophysical Research, vol. 116, 2011.
- [18] M. Grundela and J. Porstendorfer, "Differences between the activity size distributions of the different natural radionuclide aerosols in outdoor air Atmospheric Environment," vol. 38, pp. 3723-3728, 2004.
- [19] J. Crawford, S. Chambers, D. Cohen, A. Williams, A. Griffiths, and E. Stelcer, "Assessing the impact of atmospheric stability on locally and remotely sourced aerosols at Richmond, Australia," using Radon-222, Atmospheric Environment, vol. 127, pp. 107-117, 2016.
- [20] H. Mala, L. Tomasek, P. Rulik, V. Beckova, and J. Hulka, "Size distribution of aerosol particles produced during mining and processing uranium ore, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 157, pp. 97-101, 2016.
- [21] L. L. Su, G. Q. Liu, M. X. Ding, J. P. Feng, H. Zhang, "A study of ^{210}Po in atmospheric aerosol of Shenzhen and its committed effective dose," China, Environ. Sci., vol. 37, pp. 2025-2028, 2017. (Article in Chinese with English abstract)
- [22] J. Ouyang, G. Yang, L. Ma, M. Luo, and D. Xu, "Development and Application of Fingerprints of Radioactive Cesium-Plutonium-Uranium Isotopes as Tracers in Air Pollution," Progress in Chemistry, vol. 29(12), pp. 1446-1461, 2017.
- [23] J. Ouyang, L. J. Song, L. L. Ma, M. Luo, Y. Shao, X. X. Dai, G. S. Yang, Y. G. Yang, M. Y. Luo, and D. D. Xu, "Temporal variations, sources and tracer significance of Polonium-210 in the metropolitan atmosphere of Beijing," China, Atmospheric Environment, vol. 193, pp. 214-223, 2018.
- [24] M. Długosz-Lisiecka, "Excess of ^{210}Po activity in the surface urban atmosphere," Part (1) fluctuation of the ^{210}Po excess in the air. Environmental Science: Processes & Impacts, vol. 17(2), pp. 458-464, 2015.
- [25] P. Amini and A. Emami, "Report of one hundred thousand sheets of Tehran Plain," Geological and Mineral Exploration