



## Research Paper;



### Investigation of the release and uptake of human-derived radionuclides from the stabilized waste cloud resulting from the nuclear bomb explosion in central Iran

Zahra Dehghan Bahabadi<sup>1</sup>, Saeed Ghorbani Sehat<sup>2</sup>

1. Master's student, Radiation Health, Faculty of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran Email: [zdehghanb2007@gmail.com](mailto:zdehghanb2007@gmail.com)

2. Master's degree in Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran Email: [saeed.gh@gmail.com](mailto:saeed.gh@gmail.com)

#### Article Information

#### Abstract

**Accepted:**  
2024/09/06

**Received:**  
2025/04/15

#### Keywords:

*HYSPLIT,  
nuclear  
contaminants,  
atmospheric  
dispersion,  
atomic bomb*

#### Corresponding

**Author:**

**Zahra**

**Dehghan**

**Bahabadi**

**Email:**

[zdehghanb2007@gmail.com](mailto:zdehghanb2007@gmail.com)

This study investigates the emission of radioactive contaminants and the dose received from a hypothetical nuclear bomb explosion in central Iran using HYSPLIT and GDAS data without considering chemical reactions. The results showed that the direction of emission and deposition of radioactive nuclei is mainly northeast and to a lesser extent southeast of the explosion site, and the spread of radioactive materials reaches about 300 km from the explosion site 12 hours after the explosion, and Yazd province, southern areas of South Khorasan, and northern Kerman province are involved. Initially, the plume grows rapidly and reaches an altitude of 5000 meters. Over time, the height of the particles decreases and they deposit more, and the maximum concentration of particle deposition is greater than their emission concentration, and the maximum concentration and deposition of particles is in the northeast of the explosion site, about 200 km from it, where the dose received by humans reaches more than 100 millisieverts. Also, the total dose received by people on the ground at an altitude of 0 meters is greater than the total dose received at an altitude of 0 to 100 meters. Over time, the concentration of the atomic cloud decreases, and as a result, the dose received by people also decreases. The dose received by people is often much higher than the permissible limit set by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). In terms of radioactivity, a small number of areas were found to be in the controlled area and most were in the prohibited area. This research emphasizes the importance of predicting and modeling the spread of radioactive contaminants and shows that instantaneous atmospheric conditions have a great impact on the accuracy of predictions, and that the spread and deposition of particles and the dose distribution are strongly dependent on the climatic conditions of the region.

HOW TO CITE: Zahra Dehghan Bahabadi, Saeed Ghorbani Sehat, Investigating the amount of atmospheric transmission and distribution and deposition of radioactive pollutants in the radioactive waste cloud and the dose received by humans due to the nuclear bomb explosion in the central part of Iran. , Journal of Aerospace Defense 2025



## فصلنامه علمی دفاع هو فضایی

دوره ۳، شماره ۴

زمستان ۱۴۰۳

صفحات ۱۲۴-۹۸



مقاله پژوهشی؛  DOI

### بررسی میزان انتشار ونهشت آلاینده های پرتوزا و دوز دریافتی انسان از ابر پسماند تثبیت

#### شده ناشی از انفجار بمب هسته ای در مرکز ایران

زهرا دهقان بهابادی<sup>۱</sup>، سعید قربانی صحت<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، بهداشت پرتوها، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد ایران رایانامه:

dehghanb2007@gmail.com

۲. کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران رایانامه: saead.gh@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p><i>HYSPLIT</i> آلاینده های هسته ای، پخش جوی، بمب اتمی</p> <p>نویسنده مسئول: زهرا دهقان بهابادی</p> <p>ایمیل: <a href="mailto:zdehghanb2007@gmail.com">zdehghanb2007@gmail.com</a></p>	<p>این تحقیق به بررسی میزان انتشار آلاینده های پرتوزا و دوز دریافتی ناشی از انفجار بمب هسته ای فرضی در مرکز ایران با HYSPLIT داده های GDAS بدون بررسی واکنش های شیمیایی می پردازد. نتایج نشان داد جهت انتشار و رسوب هسته های پرتوزا به طور عمده شمال شرقی و مقدار کمی جنوب شرقی محل انفجار است و گسترش مواد پرتوزا ۱۲ ساعت پس انفجار حدود ۳۰۰ کیلومتر از محل انفجار می رسد و استان یزد و نواحی جنوبی خراسان جنوبی و شمال استان کرمان درگیری شوند. در ابتدا توده بشدت رشد کرده و تا ارتفاع ۵۰۰۰ متر میرسد. با گذشت زمان، ارتفاع ذرات کاهش یافته و بیشتر رسوب می کنند و مقدار بیشینه غلظت رسوب ذرات بیشتر از مقدار غلظت انتشار آنها است و بیشینه غلظت و رسوب ذرات در مناطق شمال شرقی محل انفجار حدود ۲۰۰ کیلومتر از آن است جایی که دوز دریافتی انسان ها به بیش از ۱۰۰ میلی سیورت می رسد. همچنین، میزان دوز کل دریافتی افراد روی سطح زمین در ارتفاع ۰ متر بیشتر از دوز کل دریافتی در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر است. با گذشت زمان، غلظت ابر اتمی کاهش یافته و در نتیجه دوز دریافتی افراد نیز کاهش می یابد. میزان دوز دریافتی افراد اکثر اسیار بیشتر از حد مجاز تعیین شده توسط کمیسیون بین المللی حفاظت در برابر اشعه (ICRP) می باشد. از نظر پرتوزایی، تعداد کمی از مناطق جزو ناحیه کنترل شده و اکثر جزو ناحیه ممنوعه به دست آمدند این تحقیق بر اهمیت پیش بینی و مدل سازی نحوه انتشار آلاینده های پرتوزا تأکید دارد و نشان می دهد که شرایط جوی لحظه ای تأثیر زیادی بر دقت پیش بینی ها دارد و انتشار و رسوب ذرات و توزیع دوز به شدت به شرایط آب و هوایی منطقه وابسته است.</p>
<p>استناد: زهرا دهقان بهابادی، سعید قربانی صحت، بررسی میزان انتشار ونهشت آلاینده های پرتوزا و دوز دریافتی انسان از ابر پسماند تثبیت شده ناشی از انفجار بمب هسته ای در مرکز ایران مجله علمی پژوهشی دفاع هو فضایی، ۱۴۰۳</p>	

## ۱- مقدمه

انفجار بمب هسته‌ای یکی از فاجعه‌بارترین رویدادهایی است که می‌تواند اثرات مخرب گسترده‌ای بر محیط زیست و سلامت انسان داشته باشد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای چنین انفجاری، انتشار مواد پرتوزا در اتمسفر و پخش آن در مناطق وسیع است. این مواد پرتوزا می‌توانند از طریق باد و بارش به مناطق دوردست منتقل شده و آلودگی رادیواکتیو گسترده‌ای ایجاد کنند [۱]. این موضوع در حال حاضر فراتر از مرزها رفته و به یک بحران جهانی تبدیل شده است که کشورها و ملت‌ها را درگیر می‌کند [۲]. وقوع جنگ‌های اتمی و حوادث راکتورهای اتمی در کشورهای ژاپن، آمریکا، فرانسه، برزیل، انگلیس، روسیه، اوکراین و ... منجر به پخش و انتشار مواد پرتوزای خطرناک در محیط زیست شده است [۳]. پیش‌بینی و مدل‌سازی نحوه انتشار و پخش این آلاینده‌های پرتوزا در جو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سال ۱۹۷۰ با ورود اطلاعات ماهواره‌ای به جوامع ملی و دانشگاهی، پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از دانش سنجش از دور و ردیابی مسیر انتشار این مواد انجام شده است [۴]. پخش آلاینده‌ها در هوا به انتقال آن‌ها توسط باد و همچنین پخش همزمان ناشی از آشفته‌گی‌های جوی و فرآیندهای تعدیل مانند فرسایش وابسته است. مدل‌های پخش اتمسفری به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: مدل گوسی، مدل‌های مسیر حرکت یا PUFF، دو بعدی و مدل‌های سه بعدی [۵].

نرم‌افزارهای متعددی برای شبیه‌سازی انتشار مواد پرتوزای ناشی از حوادث سلاح‌ها و نیروگاه‌های هسته‌ای وجود دارند. مدل HYSPLIT که برای اولین بار توسط آزمایشگاه منابع هوایی NOAA سال ۱۹۸۲ ایجاد و با همکاری اداره هواشناسی استرالیا توسعه یافت، کاربردهای متنوعی شامل ردیابی و پیش‌بینی مسیر آلاینده‌ها، مسیریابی ذرات هوا، خاکسترهای آتشفشانی، دود ناشی از آتش‌سوزی‌های مخرب و پخش جوی مواد حاصل از حوادث هسته‌ای و شیمیایی و همچنین شبیه‌سازی پراکندگی و ته‌نشینی آن‌ها دارد [۳، ۶، ۷].

به عنوان یک مدل دوربرد، برای مدل‌سازی حوادث و فوریت‌های هسته‌ای مناسب است [۲]. روش محاسبه HYSPLIT ترکیبی از روش‌های لاگرانژی و اویلری است که این دو روش به طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. در این مدل، پخش ذرات به صورت سه‌بعدی و گوسی انجام می‌شود. در پخش سه‌بعدی، آلاینده از منبع آغاز شده و در سه جهت پخش می‌شود. در پخش گوسی، منبع به عنوان یک دودکش نقطه‌ای در نظر گرفته

<sup>1</sup> NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

می‌شود و آلاینده به صورت گوسی منتشر شده و غلظت پراکندگی هوای آلوده در پایین دست محاسبه می‌گردد [۵، ۸].

Moroz و همکاران [۸] با بررسی انتشار و رسوب مواد پرتوزای ناشی از آزمایش بمب هسته‌ای در جزایر مارشال، به این نتیجه رسیدند که کمیت و کیفیت داده‌های هواشناسی، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دقت پیش‌بینی مدل‌های شبیه‌سازی هستند و فاصله بین نقاط داده‌ای ورودی در شبکه، بر دقت محاسبات مدل اثرگذار است. نتایج این مدل با مدل‌های دیگر مقایسه شد که در بعضی موارد مشابه و در بعضی موارد متفاوت بودند که تفاوت‌ها احتمالاً به دلیل اختلاف داده‌های هواشناسی (باد) ذکر شده است.

Beck و همکاران [۹]، رسوب مواد پرتوزا ناشی از آزمایش‌های هسته‌ای در جزایر مارشال را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان جذب مواد پرتوزا توسط انسان‌ها با داده‌های جمع‌آوری شده از مناطق آلوده و همچنین داده‌های موسسه ملی سرطان همخوانی دارد. Wendel و همکاران [۱۰]، به بررسی انتقال دوربرد ذرات حاوی اورانیوم و پلوتونیوم از محل آزمایش‌های هسته‌ای در قزاقستان به نروژ پرداختند. این پژوهش، انتقال دوربرد این ذرات تانروژ را تأیید کرد و نتایج نشان داد که غلظت این ذرات در نمونه‌های جمع‌آوری شده در فصل‌های پاییز و زمستان نسبت به بهار و تابستان کمتر است. که این امر احتمالاً به دلیل تغییرات در شرایط جوی و فعالیت‌های تروپوسفری در ماه‌های مختلف سال است.

Rolph و همکاران [۱۱]، به مدل‌سازی ریزش ابرهای هسته‌ای تثبیت‌شده ناشی از ۶ آزمایش هسته‌ای انجام شده در سایت نوادا بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۵۷ با حذف ته نشست مرطوب ذرات (چون آزمایش‌های نوادا طوری طراحی شدند که وقتی باران نمی‌بارد انجام شوند و رسوب مرطوب در شرایط بارندگی نقش مهمی می‌تواند داشته باشد و اغلب می‌تواند منجر به افزایش موضعی رادیواکتیویته شود) پرداختند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی، به‌ویژه هنگامی که از مدل هواشناسی WRF ۱ استفاده شد، با داده‌های هواشناسی موجود تطابق بسیار خوبی داشت و دقت بالایی را نشان داد.

suh و همکاران [۱۲]، به توسعه مدلی برای ردیابی مسیر انتشار مواد پرتوزا پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری اساسی برای شناسایی و بررسی فعالیت‌های هسته‌ای مخفی در کشورهای همسایه کره شمالی مورد استفاده قرار گیرد.

Philippe وهمکاران [۱۳] با بررسی پیامدهای آزمایش‌های هسته‌ای اتمسفری در مناطق نیومکزیکو و نوادای ایالات متحده، دریافتند که مواد رادیواکتیو حاصل از این انفجارها در بسیاری از موارد از مرزهای کانادا و مکزیک عبور کرده و در برخی مناطق، به ویژه در رسوبات یک دریاچه، تراکم بالایی از پلوتونیوم مشاهده شده است.

نعناکاروهمکاران [۳] با استفاده از شبیه‌سازی، به بررسی پخش مواد رادیواکتیو ناشی از انفجار انواع مختلف بمب‌های هسته‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش قدرت انفجار بمب هسته‌ای، منجر به گسترش بیشتر منطقه آلوده به مواد رادیواکتیو می‌شود.

Lisowski وهمکاران به بررسی پتانسیل استفاده از سلاح‌های هسته‌ای کم‌بازده و تأثیر ارتفاع انفجار بر روی ریزش‌های هسته‌ای پرداختند [۱۴]. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ارتفاعی که در آن انفجار هسته‌ای رخ می‌دهد، نقش بسیار مهمی در میزان و گستره آلودگی رادیواکتیو ناشی از ریزش‌های هسته‌ای دارد.

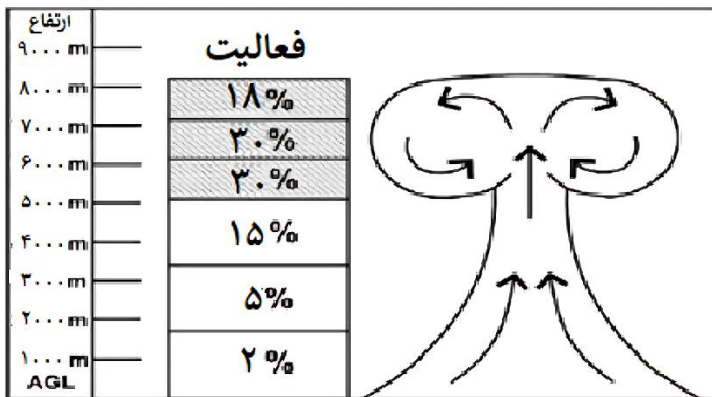
Yao وهمکاران به بررسی انتقال هسته‌های پرتوزا در مناطق قطبی پرداختند [۱۵]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که مواد پرتوزا قبل از رسوب در یخچال‌های طبیعی ژاپن، اقیانوس آرام، اروپا و آسیای مرکزی، مسافت‌های طولانی را طی کرده و حتی به لایه استراتوسفیر جو زمین نیز رسیده‌اند. هدف از این مطالعه، واکاوی نحوه انتقال و پخش جوی ورسوب آلاینده‌های پرتوزا ناشی از یک انفجار هسته‌ای فرضی در مرکز ایران و ارزیابی میزان دوز دریافتی بر جمعیت‌های انسانی است. این بررسی می‌تواند به درک بهتر خطرات بالقوه چنین رویدادی و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش آسیب‌های احتمالی کمک کند.

## ۲- روش شناسی

در این پژوهش، سناریویی شبیه‌سازی شده که در آن انفجار یک بمب پلوتونیومی ۲.۵ کیلوتنی در مرکز ایران (با مختصات جغرافیایی ۳۱.۰۰ درجه شمالی و ۵۴.۰۰ درجه شرقی) منجر به رهاسازی ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد پرتوزا در محیط زیست شده است. در این بخش ۲ هدف عمده دنبال می‌شود. در اولین قدم میزان غلظت انتشار و ته نشست مواد پرتوزا در ارتفاع ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از سطح زمین و بر روی زمین، سپس میزان دوز دریافتی توسط افراد در ارتفاع ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از سطح زمین و روی سطح زمین محاسبه می‌شود. همچنین از تأثیر آلاینده‌ها بر محیط صرف نظر شده و تنها الگوی پاشندگی بررسی شده است. در هنگام وقوع چنین حوادثی، برای پیش‌بینی دقیق نحوه پراکندگی آلودگی رادیواکتیو، بحث فصول و میانگین شرایط هواشناختی ماههای هرفصل مطرح نیست بلکه روز و ساعت دقیق وقوع حادثه مهم هستند. به عبارت دیگر شرایط جوی لحظه‌ای و محلی، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر نحوه انتشار و گسترش آلودگی رادیواکتیو دارند. برای محاسبه میزان غلظت و ته نشست مواد پرتوزا و دوز دریافتی افراد مدل HYSPLIT نسخه ۴ به کار گرفته شده است. روش محاسبه HYSPLIT ترکیبی از روش لاگرانژی و اویلری است [۴، ۱۶، ۱۷].

کلمه Hybrid در HYSPLIT به توانایی خاص این مدل برای بیان آلودگی به صورت گوسی یا بالا-کلاه اشاره میکند در صورتیکه برای محاسبات پراکندگی عمودی آلودگی به صورت ذره رفتار میکند [۱۸]. پارامترهای گوناگونی برای شبیه سازی در مدل HYSPLIT اعم از داده های هواشناسی، ته نشست خشک، ته نشست مرطوب، بازتعریق ذرات ته نشست شده، چگالی، شکل، قطر و نیمه عمر ذرات، مورد نیاز است. در این پژوهش از داده های هواشناسی GDAS<sup>۱</sup> با مختصات مکانی یک درجه و شرایط فشاری ایزوبار استفاده شده است. شبکه مدل سازی با تفکیک مکانی ۳۰ درجه و مرکز آن استان یزد با طول و عرض جغرافیایی ۳۱.۹۰۵۵۴۱۵ و ۵۴.۳۲۷۳۹۲۶ در نظر گرفته شده است. پس از گذشت چندین روز تعداد بسیار زیادی از هسته های پرتوزا با دلیل نیمه عمر پایین خود از بین خواهند رفت و تنها عناصری بانیمه عمر بالا در فواصل بسیار دور از چشمه تاثیر گذار خواهند بود بنابراین این مدل برای شبیه سازی ۱۲ ساعت ابتدایی روز اول ماه می سال ۲۰۲۳ اجرا شده است.

برای تخمین حدودی میزان انتشار ایزوتوپ های رادیواکتیو از یک بمب اتمی میتوان از تخمین های کلی و داده های موجود استفاده کرد. گرچه این مقادیر میتواند بسته به شرایط مختلف متفاوت باشد ولی بطور کلی تخمین زده میشود از یک بمب هسته ای با قدرت ۲.۵ کیلو تن چند درصد معین از جرم کل بمب به هر کدام از ایزوتوپهای رادیواکتیو تبدیل میشود که با استفاده از فرمولهای ریاضی موجود میزان انتشار هر کدام از آلاینده ها بر حسب بکرل بر ساعت تعیین میشوند. نتایج شبیه سازی غلظت انتشار و رسوب مواد پرتوزا و دوز دریافتی افراد در ارتفاع های صفر و تا ۱۰۰ متری از سطح زمین را برآورد می کند. برای مدل سازی سریع ریزش اتمی، بجای محاسبه تکامل پیچیده ابر، تعیین دقیق ویژگی های ابر هسته ای پس از تثبیت آن ضروری است. در شکل ۱ شمایی از ابر حاصل از انفجار بمب اتمی ۱۰ کیلو تنی آورده شده است. ناحیه سایه دار لایه هایی را نشان میدهد که کلاهک ابر را مشخص میکند.



شکل ۱- شماتیک ابر اتمی حاصل انفجار بمب ۱۰ کیلو تنی [۱۱].

<sup>۱</sup> GDAS : Global Data Assimilation System

ابر هسته ای زمانی تثبیت میشود که دمای آن بادمای هوای مجاورش به تعادل برسد. در این هنگام رشد عمودی ابرمتوقف میشود. ذرات هسته ای بطورمستقیم توسط واکنش شکافت خارج شده و بر اساس اندازه، شکل و چگالی ذره درجو سقوط میکنند. در این مطالعه، برای ساده کردن ابر هسته‌ای تثبیت شده به شکل یک استوانه فرض و به ۶ لایه (دیسک) تقسیم شده است. این تکنیک پیش بینی بر اساس دستورالعمل<sup>۱</sup> (2012) NATO تعریف شده است. ضخامت و ارتفاع هر لایه به بازده هسته ای بمب بستگی دارد.

جدول ۱- مشخصات ابر حاصل از انفجار بمب های اتمی با اندازه های مختلف [۱۱]

بازده (کیلو تن)	<=2.5	<=7.5	<=12.5	<=17.5	<=22.5	<=27.5	<=32.5	<=37.5	<=42.5	<=450
سطح (۷ متر)	3700	6300	8200	9700	10800	11200	11600	11900	12200	12500
سطح (۶ متر)	3132	5434	7166	8532	9532	9900	10232	10500	10766	11000
سطح (۵ متر)	2566	4567	6130	7366	8266	8600	8866	9100	9333	9500
سطح (۴ متر)	2000	3700	5100	6200	7000	7300	7500	7700	7900	8000
سطح (۳ متر)	1334	2466	3400	4132	4666	4866	5000	5132	5266	5332
سطح (۲ متر)	667	1233	1700	2066	2333	2433	2500	2566	2633	2666
سطح (۱ متر)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

همچنین فرض شده است که تمام ذرات از یک خط عمودی از طریق مرکز بجای کل قطر ابر آزاد میشوند این فرض طبق مقاله Rolph و همکاران ثابت کرده نباید بطور قابل توجهی بر نتایج تاثیر بگذارد [۱۱]. برای توصیف هر لایه، ۱۴ نوع ذره با اندازه های مختلف در نظر گرفته شده است. این ذرات شامل یک نوع ذره نماینده گازهای نجیب و ۱۳ نوع ذره پرتوزا با نیمه عمرهای متفاوت هستند. با فرض اینکه بخش عمده ای از مواد رادیواکتیو به ذرات خاک چسبیده اند، فرض شده است که ذرات شکل کروی داشته و چگالی آن ها به طور متوسط ۲.۵ گرم بر سانتی متر مکعب است [۳]. اندازه ذرات بین ۲۰ تا ۵۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. سرعت ته نشست ذرات بر اساس نوع پوشش زمین و فرآیندهای درون وزیر ابری محاسبه شده است.

محاسبات مربوط به ته نشست خشک در همه مدل سازیها بسیار حساس و نامطمئن است. زیرا این پارامتر به تاثیر متقابل بین پارامترهای مدل شده و پوشش زمین حساس است که با زمان و مکان

<sup>1</sup> NATO: NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION

تغییر میکند. رویکرد ته نشست خشک ثابت باوجود همه عدم قطعیت هایش در این تحقیق به کارفته است. اگرچه این رویکرد بسیار نامطمئن است اما بطور گسترده در مدل‌های سینوپتیک به کار میرود. برای مناطق شهری، سرعت متوسط ته نشست خشک  $0.0005$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۱۸]. حذف ذرات خشک بر اساس سرعت ته نشینی گرانشی ذرات محاسبه می شود. برای ته نشست مرطوب فرآیندهای درون وزیبرای مانند برخورد و چسبندگی ذرات به قطرات آب، با ضرایب  $4E+4$  و  $5E-5$  مدل سازی شده‌اند. فرآیند بازتعلیق ذرات با ضریب  $1E-6$  و برای گازهای نجیب  $0$  در نظر گرفته شده است و به این معنی است که از هر یک میلیون ذره ای که در زمین مینشینند تنها یک ذره دوباره از سطح زمین جدا شده و وارد هوا می گردد. بیشتر داده ها برای نرخ بازتعلیق بعد از مطالعه بر روی حادثه چرنوبیل به دست آمده است [۱۸]. نیمه عمر ذرات در جدول ۲ تعیین گردید.

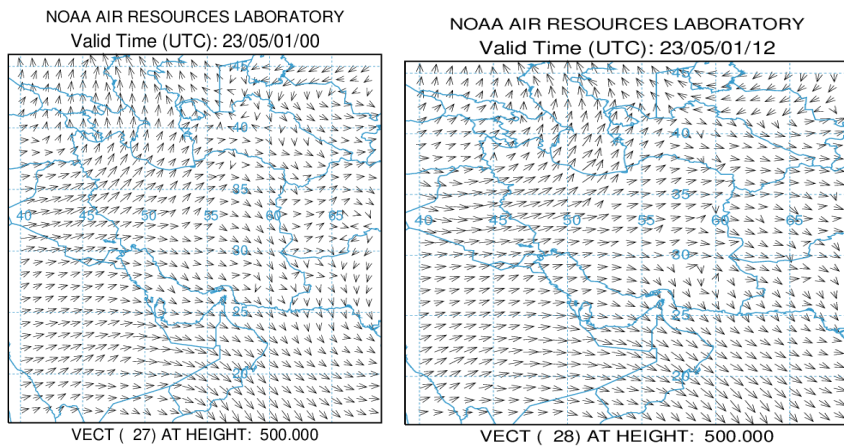
جدول ۲- نیمه عمر مواد پرتوزا در ابر حاصل از انفجار اتمی [۳]

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
ذره پرتوزا	I131	Ba140	Cs136	Ru103	Sr89	Ce144	Ru106	Sr90	H3	Pu241	Cs137	Cl14	Pu240+239
نیمه عمر	۸.۰۲ روز	۱۲.۸ روز	۱۳.۲ روز	۴۹.۳ روز	۵۰.۵ روز	۲۸۵ روز	۳۷۴ روز	۲۸.۵ سال	۱۲.۳ سال	۱۴.۴ سال	۳۰.۱ سال	۵۷۰۰ سال	۶۵۶۰ سال
قطر ذرات (میکرومتر)	۵۰۰	۳۵۰	۲۷۵	۲۲۵	۱۸۷.۵	۱۶۲.۵	۱۳۷.۵	۱۱۲.۵	۸۷.۵	۷۰	۵۷.۵	۴۵	۲۰

برای مدل سازی دقیق ۳ بعدی پراکندگی ذرات ناشی از بمب هسته ای بدلیل زیاد بودن ذرات نیازمند محاسبات فراوانی است. از این رو اعمال یکسری قیود در قسمت تنظیمات پیشرفته نرم افزار ضروری است [۳]. در این تحقیق به منظور شبیه سازی انتشار از رویکرد ذره ای ۳ بعدی و PUFF برای رهاسدن در راستای عمودی وافقی استفاده شده و نرخ رهاسدن ذرات و بیشینه ذرات قابل تعریف در هر شبکه طبق راهنمای وب سایت HYSPLIT [۱۹] برای بمب هسته ای به ترتیب  $15000$  و  $200000$  مشخص شده که نشان دهنده این است هنگامی که تعداد ذرات از بیشینه آن بیشتر شود قطع میگردد همچنین بازه زمانی ۳ ساعته تنظیم شده است [۷].

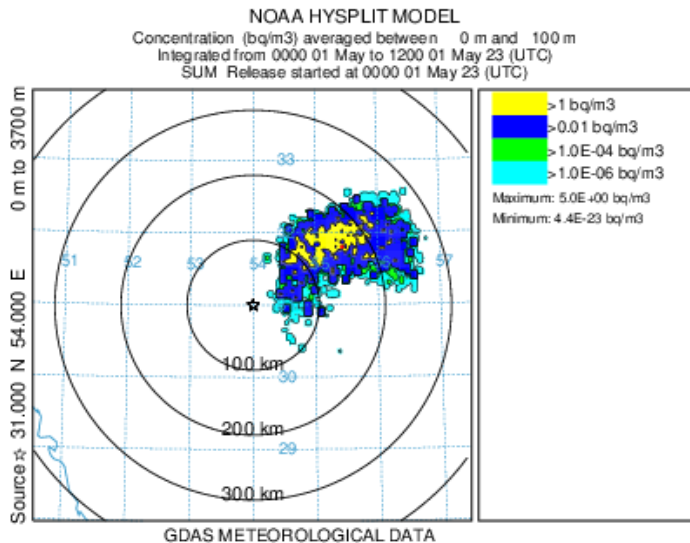
### ۳. نتایج و بحث

در شکل ۲ و ۳ میدان بادسطحی در ساعت اجرای برنامه مشاهده می شود.

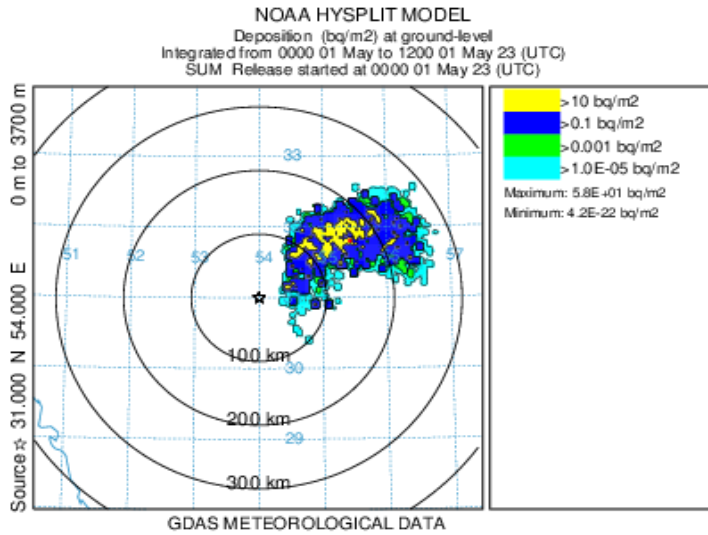


شکل ۲ و ۳: میدان بادبرداری سطحی برای تاریخ شروع ساعت ۰ روزاول می و پایان ساعت ۱۲ روزاول می باشد.

در شکل های ۴ تا ۷ انتشار و رسوب هسته های پرتوزا در منطقه ای با طول و عرض جغرافیایی ۳۱.۰۰ و ۵۴.۰۰ درجه به تصویر کشیده شده است شکل ۴ و ۵ نشان می دهد که بیشینه غلظت انتشار و رسوب ذرات در مناطق شمال شرقی محل انفجار و در فاصله ای حدود ۲۰۰ کیلومتر از آن قرار دارد. مقایسه بین رسوب و غلظت ایزوتوپ ها نشان می دهد که پخش این مواد در هر دو حالت بیشتر به سمت شمال شرقی و تا حدودی به سمت جنوب شرقی انجام می شود.

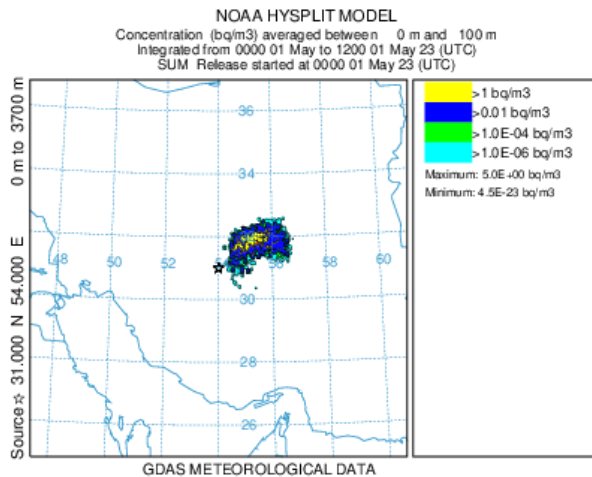


شکل ۴ - شبیه سازی انتشار ماده هسته ای ناشی از بمب اتمی در ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح زمین

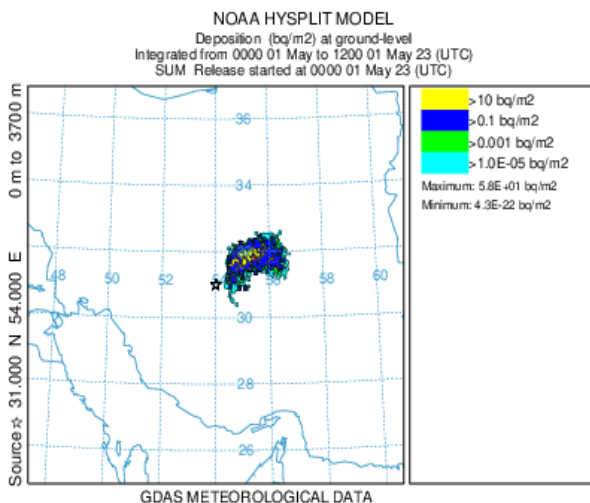


شکل ۵- شبیه سازی نهشت ماده هسته ای ناشی از بمب اتمی بر روی سطح زمین

اشکال ۶ و ۷ نشان می دهند که گسترش مواد پرتوزا ۱۲ ساعت پس از وقوع انفجار به نواحی حدود ۳۰۰ کیلومتر می رسد. به عبارت دیگر در این بازه زمانی، توده پرتوزا از محدوده استان یزد خارج میشود اما همچنان در داخل مرزهای کشور باقی می ماند.



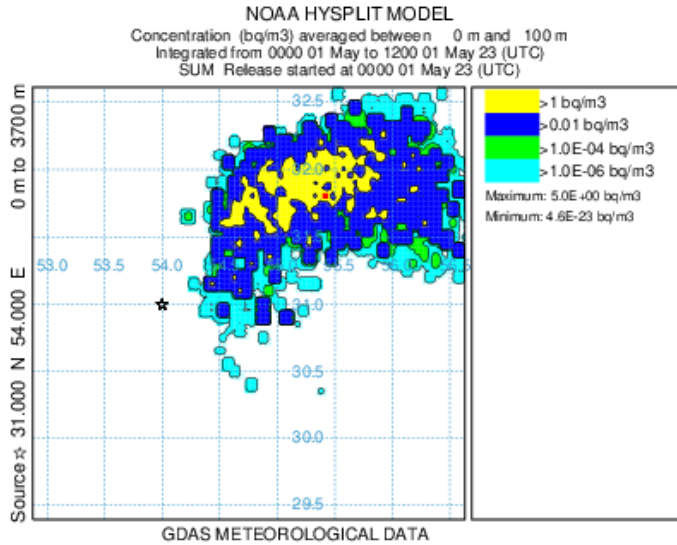
شکل ۶- شبیه سازی انتشار ماده هسته ای ناشی از بمب اتمی در ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح زمین در ایران



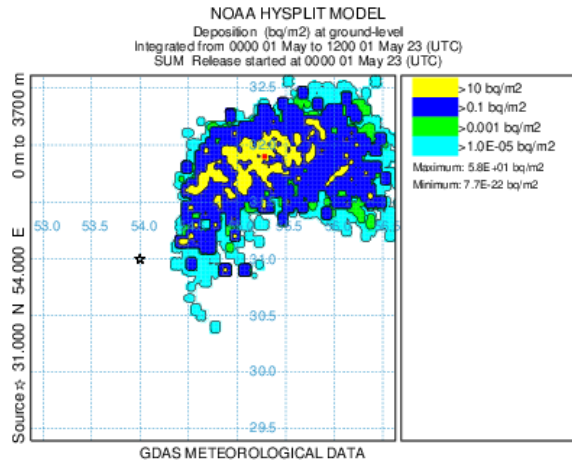
شکل ۷- شبیه سازی نهشت ماده هسته ای ناشی از بمب اتمی بر روی سطح زمین در ایران

در حوادث هسته ای، مواد پرتوزا به دلیل دما و سرعت بالای انتشار، با ارتفاع مؤثر بیشتری در جو پراکنده می شوند. این افزایش ارتفاع تأثیر قابل توجهی بر توزیع مواد پرتوزا در اطراف محل انفجار دارد. به طور کلی هرچه ارتفاع مؤثر بیشتر باشد غلظت کل مواد پرتوزا در نواحی اطراف محل حادثه کاهش می یابد. این نکته به ویژه در شرایط آب و هوایی مختلف (از جمله جهت و سرعت باد) اهمیت پیدا می کند و می تواند نحوه پخش هسته های پرتوزا را تحت تأثیر قرار دهد [۱۸].

با توجه به تغییرات در جهت باد در فواصل مختلف، غلظت مواد پرتوزا ممکن است در نواحی نزدیک به محل حادثه در ابتدا با افزایش فاصله از محل حادثه اندکی افزایش یابد اما به طور کلی با فاصله گرفتن از محل حادثه، مقدار غلظت مواد کاهش می یابد. رنگ های مختلفی که برای هر ناحیه تعیین شده اند، نمایانگر مقدار غلظت در آن ناحیه هستند. حداکثر غلظت انتشار در مواردی بیش از  $10^{-6}$  بکرل بر مترمکعب با رنگ زرد نمایش داده شده است در حالی که کمترین مقدار غلظت انتشار به  $10^{-6}$  بکرل بر مترمکعب به رنگ آبی مربوط می شود. حداکثر غلظت رسوب بیش از  $10^{-5}$  بکرل بر مترمربع متمرکز با رنگ زرد نشان داده شده و کمترین مقدار غلظت رسوب کمتر از  $10^{-5}$  بکرل بر مترمربع به رنگ آبی است. این مقادیر نشان دهنده تأثیرات جدی مواد پرتوزا بر محیط زیست و سلامت ساکنین در فاصله ای بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر از محل حادثه می باشد (شکل ۸و ۹).



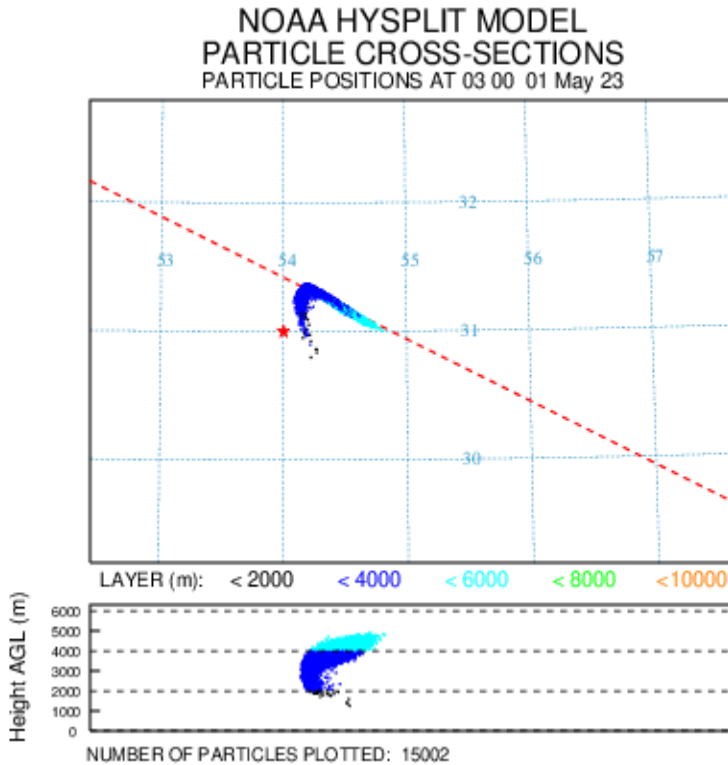
شکل ۸- غلظت (Bq/m<sup>3</sup>) ناشی از کل هسته های پرتوزای انتشار یافته از بمب اتمی در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین



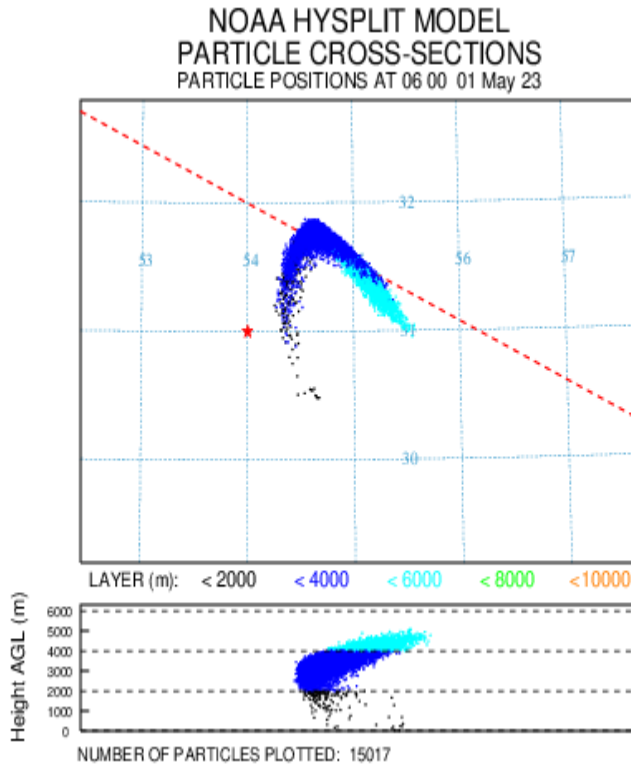
شکل ۹- غلظت (Bq/m<sup>2</sup>) ناشی از کل هسته های پرتوزای رسوب یافته از بمب اتمی بر روی سطح زمین

شکل های ۱۰ و ۱۱ مقطع عمود بر توده گرد و غبار را در وضعیت افقی و انتشار ذرات در بازه های ۳ ساعته پس از وقوع انفجار نشان می دهند. رنگ ذرات نمایانگر ارتفاع آنها است و طبق مقیاس رنگی، ارتفاع توده بین ۰ تا ۵۰۰۰ متر متغیر است. این شکل ها به وضوح چگونگی پخش و گسترش مکانی ذرات را به تصویر می کشند. توده گرد و غبار با حرکت در راستای شمال شرقی و جنوب شرقی، نواحی اطراف را تحت تأثیر قرار داده است و بیشینه ارتفاع توده به ۵۰۰۰ متر با رنگ آبی نمایش داده شده است. در ساعت ۳ توده گرد و غبار تقریباً ۱۰۰ کیلومتر در جهت طول و ۵۰

کیلومتر در جهت عرض به سمت شمال شرقی پیشرفت کرده و تا ارتفاع ۵۰۰۰ متر با رنگ آبی کمرنگ و ذرات پراکنده‌ای به ارتفاع ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه، تقریباً ۱۰ کیلومتر در طول و عرض در جهت جنوب شرقی از محل انفجار مشاهده می‌شود. پس از گذشت ۳ ساعت و در ساعت ۶ توده گرد و غبار به حدود ۱۵۰ کیلومتر در طول و ۱۰۰ کیلومتر در عرض به سمت شمال شرقی گسترش یافته و همچنان تا ارتفاع ۵۰۰۰ متر با رنگ آبی کمرنگ ادامه دارد. همچنین ذرات پراکنده‌ای به ارتفاع ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه در حدود ۴۰ کیلومتر در جهت طول و ۶۰ کیلومتر در جهت عرض جغرافیایی به سمت جنوب شرقی گسترش یافته‌اند.

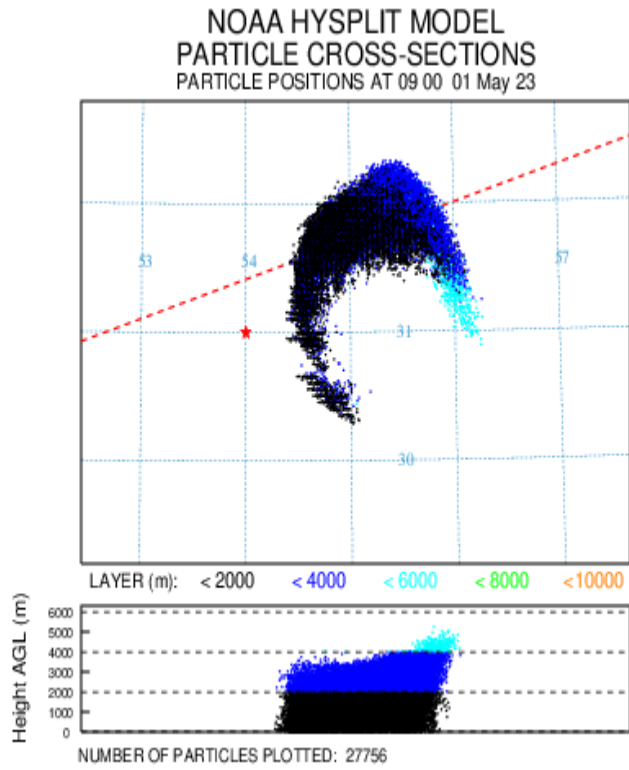


شکل ۱۰- سطح مقطع عمودبر توده گردوغبار اتمی در ساعت ۳ روزاول می باشد.

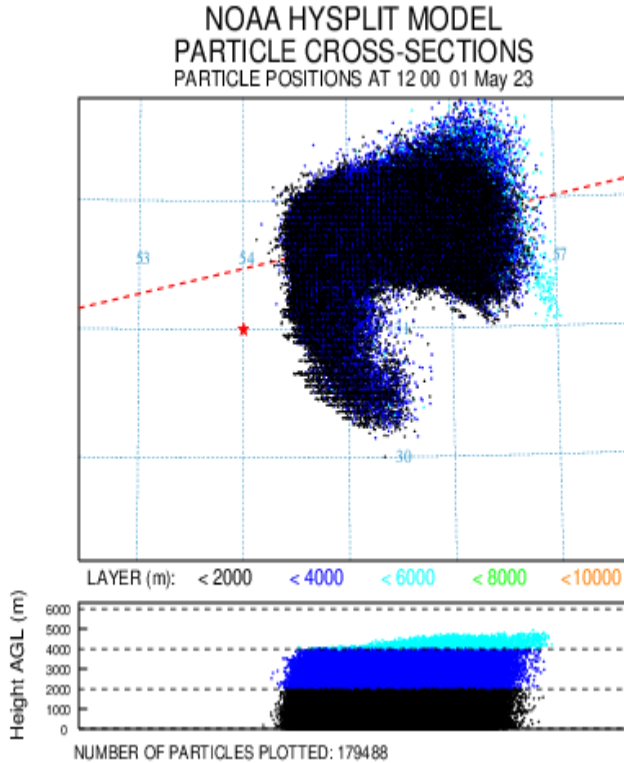


شکل ۱۱ - سطح مقطع عمود بر توده گردوغباراتی در ساعت ۶ روزاول می باشد.

با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود توده گرد و غبار در ساعت ۹ صبح حدود ۲۰۰ کیلومتر در جهت طول و ۱۲۰ کیلومتر در جهت عرض به سمت شمال شرقی گسترش یافته است. این توده به طور کلی تا حدود ۲۰۰ کیلومتر در مسافت افقی توسعه یافته و ۶۰ کیلومتر در طول و ۶۰ کیلومتر در عرض جغرافیایی می باشد. در ساعت ۱۲ توده گرد و غبار به حدود ۳۰۰ کیلومتر در عرض و ۲۰۰ کیلومتر در طول در جهت شمال شرقی گسترش یافته و در جهت جنوب شرقی نیز به طول ۱۵۰ کیلومتر و عرض ۸۰ کیلومتر توسعه یافته است. با توجه به مقیاس رنگی به کاررفته با گذشت زمان مشاهده می شود که ارتفاع ذرات به طور تدریجی کاهش یافته و بیشتر ذرات در ارتفاع ۰ تا ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه رسوب کرده اند. این تغییرات در ارتفاع نشان دهنده فرآیندهای رسوب گذاری و کاهش تحرک ذرات در جو در اثر جاذبه زمین و عوامل دیگر است. این نتایج همچنین بر اهمیت توجه به الگوهای رسوب و توزیع مواد معلق در جو تأکید می کند.

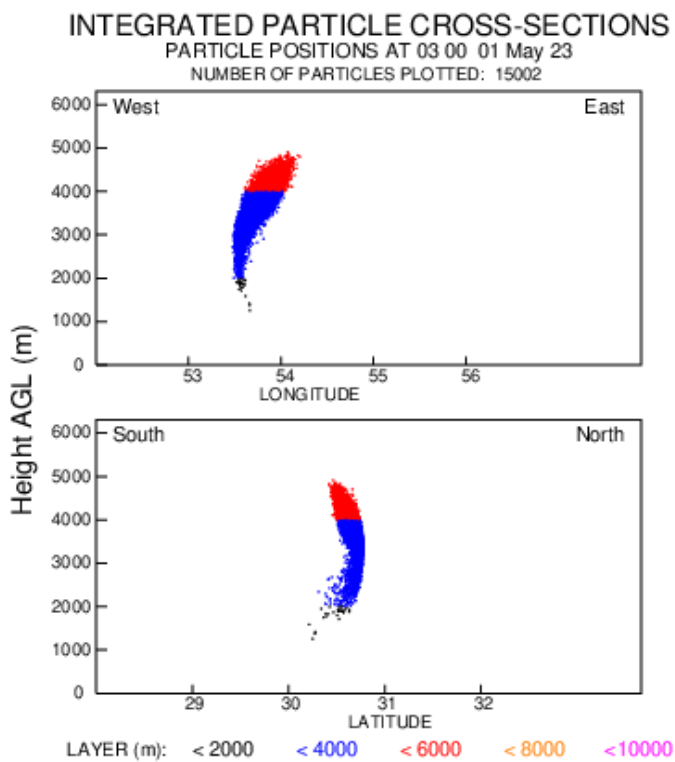


شکل ۱۲- سطح مقطع عمود بر توده گردوغبار اتمی در ساعت ۹ روز اول می باشد.

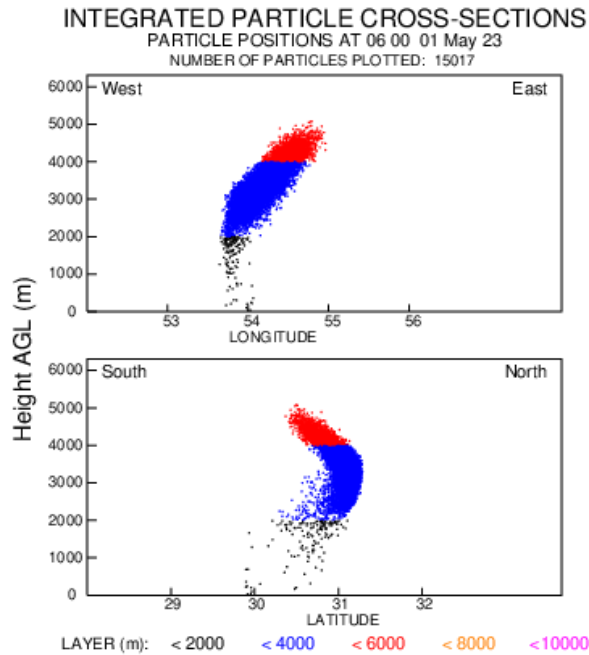


شکل ۱۳- سطح مقطع عمودبر توده گردوغبار اتمی در ساعت ۱۲ روز اول می باشد.

با توجه به اینکه فرآیند انتشار و حل مواد در این مدل به صورت ذره‌ای و سه‌بعدی صورت می‌گیرد، امکان نمایش خروجی مدل در راستای قائم وجود دارد. این نمایش می‌تواند به گونه‌ای باشد که در دو راستای عرض جغرافیایی (برش شمال به جنوب) و طول جغرافیایی (برش شرق به غرب) ارتفاع توده ذرات به دست آید. شکل‌های ۱۴ تا ۱۵ به ترتیب وضعیت قرارگیری ارتفاعی انتشار ذرات را در روز اول و در بازه‌های ۳ ساعته پس از وقوع انفجار نشان می‌دهند. در آغاز حرکت، توده گرد و غبار به سرعت رشد کرده و به ارتفاع حدود ۵۰۰۰ متر با رنگ قرمز می‌رسد. در ساعت‌های ۳ و ۶ بعد از انفجار، توده گرد و غبار به سمت جنوب شرقی حرکت کرده و به تدریج ارتفاع ذرات کاهش یافته است. این کاهش ارتفاع می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی مانند جاذبه زمین، فرآیندهای رسوب‌گذاری و همچنین تغییرات در شرایط جوی مانند تغییر در سرعت و جهت باد باشد.

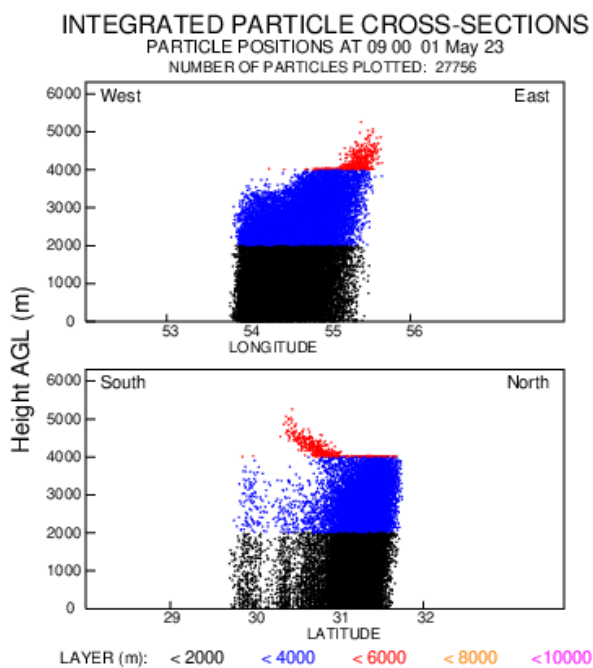


شکل ۱۴- وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گردوغبار اتمی در ساعت ۳ روز اول ماه می در د و محور طولی و عرضی جغرافیایی

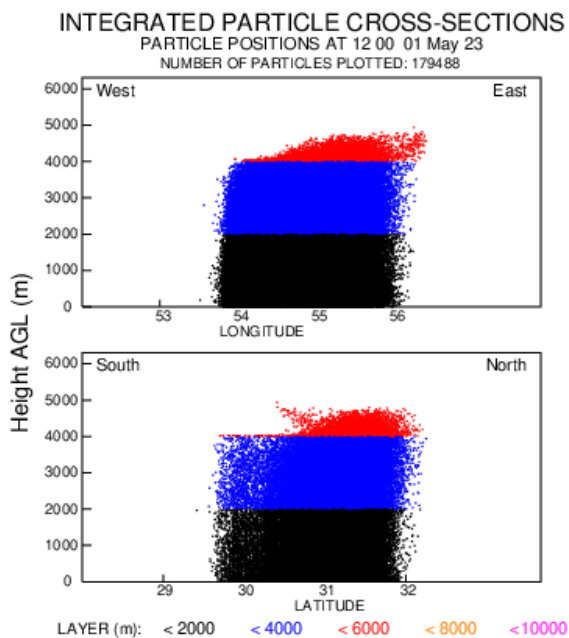


شکل ۱۵- وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گردوغبار اتمی در ساعت ۶ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی

با گذشت زمان و در ساعات ۹ و ۱۲ توده گرد و غبار به سمت شمال شرقی حرکت کرده و ارتفاع ذرات به طور قابل توجهی کاهش یافته است. بیشتر ذرات در ارتفاع ۰ تا ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه قرار گرفته و رسوب کرده‌اند. با این حال کل ارتفاع توده همچنان در بازه ۰ تا ۵۰۰۰ متر باقی مانده است. شکل ۱۶ وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گرد و غبار را در ساعت ۹ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی نمایش می‌دهد. این شکل نمایانگر گسترش اولیه توده و توزیع عمودی آن در جو را نشان می‌دهد. شکل ۱۶ نیز وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گرد و غبار را در ساعت ۱۲ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی نشان می‌دهد. در این شکل، تغییرات در ارتفاع و حرکت توده به سمت شمال شرقی به وضوح قابل مشاهده است.

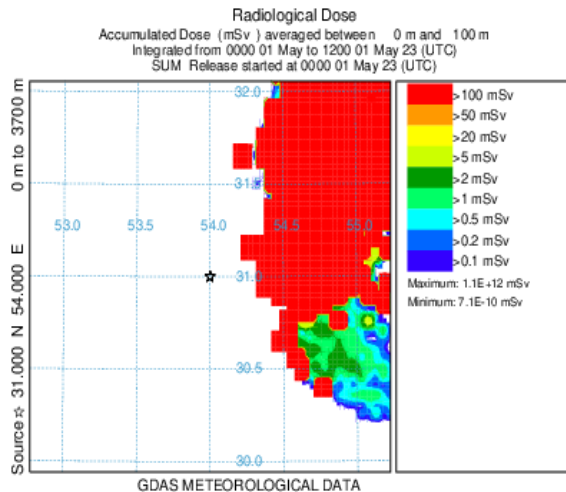


شکل ۱۶- وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گردوغبار آتمی در ساعت ۹ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی

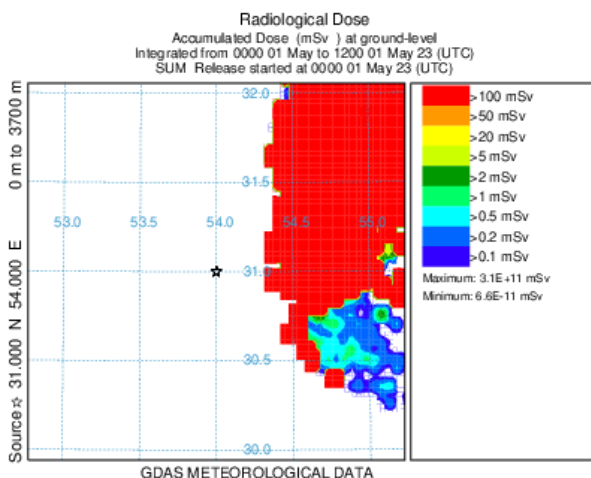


شکل ۱۷- وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گردوغبار آتمی در ساعت ۱۲ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی

شکل ۱۸ میزان دوز دریافتی افراد را در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر و شکل ۱۹ میزان دوز دریافتی افراد را در سطح زمین ۱۲ ساعت پس از وقوع انفجار نشان می‌دهد. در هر دو مورد بیشترین مقدار دوز دریافتی در مناطق شمال شرقی محل وقوع انفجار مشاهده می‌شود. رنگ هر ناحیه و منطقه نمایانگر میزان دوز کل دریافتی در آن منطقه است. نتایج نشان می‌دهد ته‌نشینی مواد پرتوزا تأثیر بیشتری نسبت به غلظت مواد در دوزگیری افراد دارد. در هر دو ارتفاع، مقدار بیشینه دوز دریافتی بیش از ۱۰۰ میلی‌سیورت با رنگ قرمز در جهت شمال شرقی منطقه است. در مقابل کمترین مقدار دوز دریافتی کمتر از ۰.۱ میلی‌سیورت با رنگ آبی در جهت جنوب شرقی منطقه است. مقادیر دوز به دست آمده نشان دهنده این واقعیت است که این حادثه برای ساکنین این مناطق یک تهدید جدی به شمار می‌رود و به ویژه ساکنین شمال شرقی محل وقوع حادثه بیشترین تأثیر را از این رویداد خواهند پذیرفت.

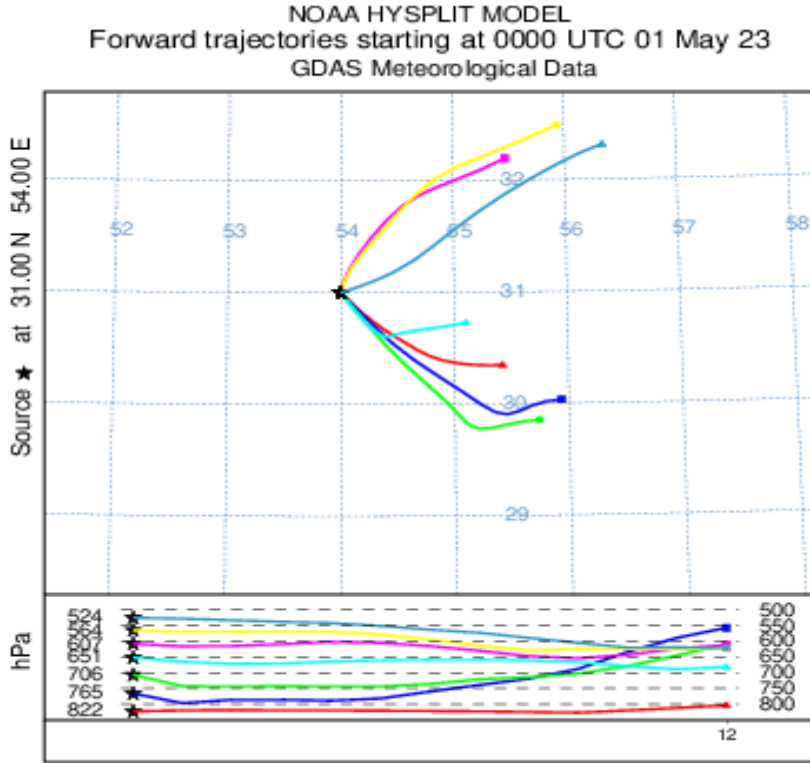


شکل ۱۸- نحوه توزیع دوز کل در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین در سناریوی انفجار بمب اتمی

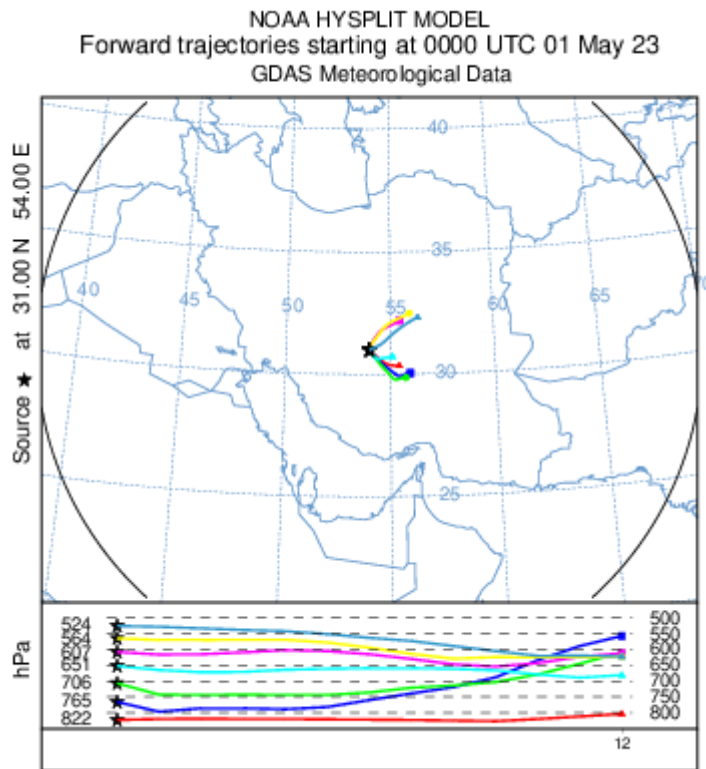


شکل ۱۹- نحوه توزیع دوز کل در روی سطح زمین در سناریوی انفجار بمب اتمی

شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مسیر کلی انتقال و حرکت توده گرد و غبار را ۱۲ ساعت پس از انتشار نشان می‌دهند. طبق این اشکال، حرکت توده تحت تأثیر جهت باد و سامانه‌های فشاری در راستای شمال شرقی و جنوب شرقی صورت گرفته است. در این اشکال، مسیر توده در ۷ سطح فشاری مختلف شامل ۸۲۲، ۷۶۵، ۷۰۶، ۶۵۱، ۶۰۷، ۵۶۴ و ۵۲۲ هکتوپاسکال مشخص شده است. هر یک از این سطوح فشاری با رنگ‌های مختلف مانند قرمز، آبی، سبز، آبی کم‌رنگ، صورتی، زرد و بنفش نمایش داده شده‌اند. این رنگ‌ها به صورتی طراحی شده‌اند که به وضوح مسیر حرکت توده را در سطوح مختلف فشار جو نمایان کنند [۴].

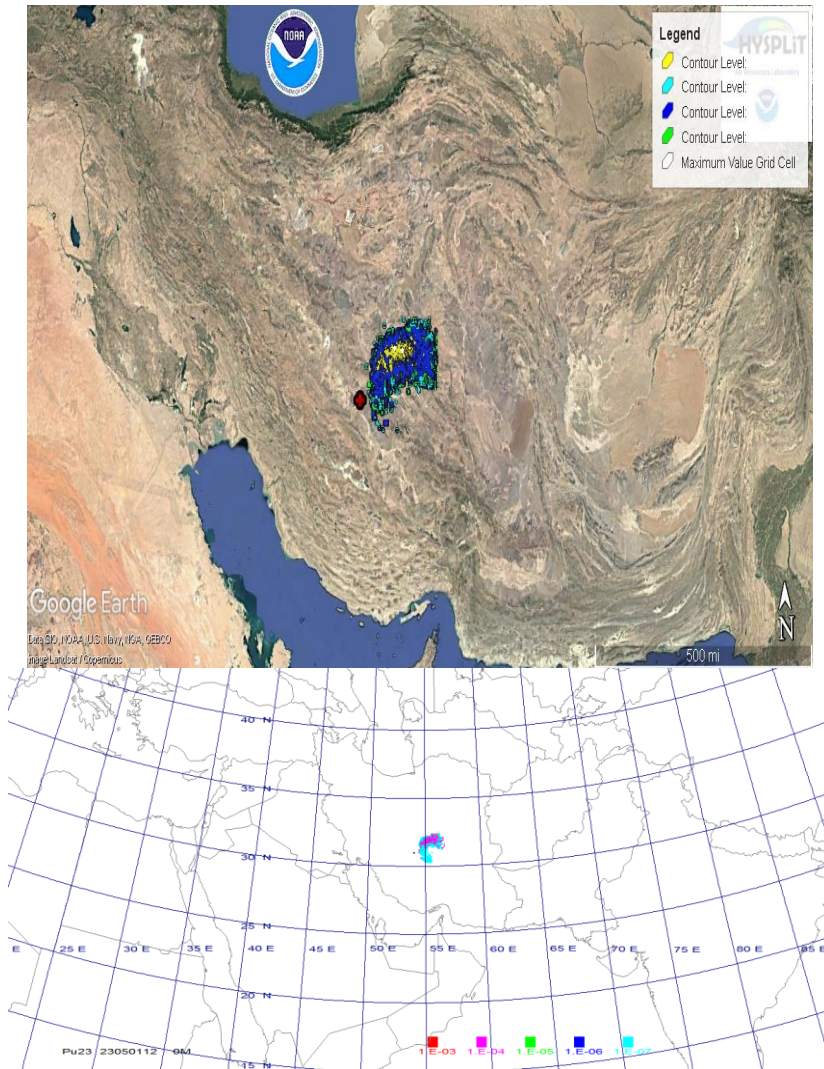


شکل ۲۰- مسیر انتقال و جابجایی مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی



شکل ۲۱ - مسیرانتقال و جابجایی مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی در ایران

شکل ۲۲ تصویر ماهواره‌ای پخش مواد پرتوزا را نمایش می‌دهد و این تصویر امکان پایش انتشار ذرات را بر روی زمین فراهم می‌کند. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت بحران و ارزیابی خطرات زیست‌محیطی، می‌تواند به بهبود واکنش به حوادث هسته‌ای و دیگر رویدادهای مشابه کمک کند.



شکل ۲۲ الف) نقشه ماهواره ای منطقه شبیه سازی شده ب) نقشه جهانی منطقه شبیه سازی شده

نتایج شبیه‌سازی پخش جوی و رسوب ذرات و دوز دریافتی افراد در این سناریو نشان می‌دهد که جهت حرکت توده گرد و غبار اتمی و انتشار و رسوب ذرات ۱۲ ساعت پس از وقوع حادثه بیشتر به سمت شمال شرقی و اندکی به سمت جنوب شرقی محل حادثه است. با گذشت زمان، ارتفاع ذرات کاهش یافته و بیشتر آنها رسوب می‌کنند. به طوری که مقدار بیشینه غلظت رسوب ذرات بیشتر از مقدار غلظت انتشار آنها است. همچنین میزان دوز کل دریافتی افراد بر روی سطح زمین بیشتر از دوز کل دریافتی در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر است. با گذشت زمان، غلظت ابر اتمی کاهش یافته و در نتیجه دوز دریافتی افراد نیز کاهش می‌یابد و انتشار و رسوب ذرات و توزیع دوز به شدت به شرایط آب و هوایی منطقه وابسته است. میزان دوز دریافتی افراد در اکثر نواحی بسیار بیشتر از حد مجاز تعیین شده

توسط کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه (ICRP) می‌باشد. حد مجاز بر طبق ICRP برای افراد جامعه ۵ میلی‌سیورت در سال است [۱۸]. از نظر پرتوزایی، تعداد کمی از مناطق جزو ناحیه کنترل شده و اکثر مناطق جزو ناحیه ممنوعه به دست آمدند.

جدول ۳- نتایج نهایی شبیه سازی

دوزدریافتی (mSv) تا ۱۰۰ متر		دوزدریافتی (mSv) سطح زمین		نهیشت (Bq/m <sup>2</sup> ) ۱۰۰-۰ متر		پاشندگی (Bq/m <sup>3</sup> ) ۱۰۰-۰ متر		زمان (ساعت)
MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	
E+12	7.1E-10	3.1E+11	6.6E-11	5.8E+1	7.7E-22	5.0E+00	1.0E-6	۱۲ ساعت

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی انتشار و پخش جوی ونهشت آلاینده‌های پرتوزا و میزان دوز کل دریافتی ناشی از انفجار یک بمب هسته‌ای فرضی در مرکز ایران با استفاده از کدمحیطی HYSPLIT پرداخته است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مواد پرتوزای زیادی به سرعت از محل انفجار خارج شده و تا حدود ۳۰۰ کیلومتر از محل انفجار گسترش داشتند و مسافت‌های قابل توجهی را به سمت شمال شرقی و اندکی به سمت جنوب شرقی طی می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین غلظت انتشار و رسوب مواد پرتوزا در نواحی شمال شرقی محل انفجار و در فاصله‌ای حدود ۲۰۰ کیلومتر از آن قرار دارد. این یافته‌ها نشان‌دهنده الگوی حرکتی مشخصی است که ممکن است در زمان واقعی نیز مشاهده شود.

تحلیل دوز دریافتی انسان‌ها در ارتفاع‌های مختلف (۰ تا ۱۰۰ متر) نشان داد که در مناطقی بالاترین غلظت مواد پرتوزا، دوز دریافتی به بیش از ۱۰۰ میلی‌سیورت رسیده است. این مقدار دوز می‌تواند عواقب جدی برای سلامت داشته باشد. با توجه به اینکه محل انفجار منطقه شهری است، ضرورت ایجاد برنامه‌های فوری برای ارزیابی و مدیریت خطرات به وضوح محسوس است. مدل HYSPLIT به عنوان یک ابزار کلیدی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی نحوه انتشار مواد پرتوزا عمل کرده است. این مدل با ترکیب روش‌های لاگرانژی و اویلری، توانسته است دقت بالایی در ارزیابی مسیر و غلظت آلاینده‌ها بصورت maximum و minimum ارائه دهد. برای صحت‌گذاری الگوی پاشندگی بدست آمده از اجرای مدل HYSPLIT بهتر است از روش‌های اندازه‌گیری دقیق تری مانند استفاده از مواد فلورسنت و رهاسازی آنها در محیط با آهنگ مشخص جهت تعیین میزان غلظت آلاینده‌ها در نقاط شبکه مورد بررسی استفاده شود.

با این کار صحت‌گذاری الگوی پاشندگی بجای کیفی بصورت کمی صورت گرفته و عدم قطعیت‌های حاصله قابل محاسبه خواهند بود. [۱۸] نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های دقیق جوی

و شرایط آب‌وهوایی لحظه‌ای برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها ضروری است. انتشار مواد پرتوزا نه تنها بر سلامت انسان بلکه بر اکوسیستم‌های محلی نیز تأثیر می‌گذارد. آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، و همچنین تأثیرات درازمدت بر تنوع زیستی از جمله عواقب احتمالی چنین حوادثی است. این مطالعه تأکید می‌کند که باید مطالعات بیشتری در زمینه تأثیرات زیست‌محیطی به عمل آید تا بتوان به درک بهتری از پیامدهای ناشی از انتشار مواد پرتوزا رسید و راهکارهایی برای به حداقل رساندن این تأثیرات ارائه داد.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان تحقیق که به صورت غیرمستقیم در پیشبرد آن نقش داشته‌اند، دارند.

## ۶- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

## ۷- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

## ۸-منابع

- [۱] رضا و، محمد عماد عخ، سیدامیرحسین ف. بررسی پخش اتمسفری تشعشعات پرتوزای در سناریوی عملکرد عادی راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از نرم افزار HYSPLIT. 2015.
- [۲] فهیمه م، سمیه ک، مریم ا. ردیابی منابع گرد و غبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT. 2016.
- [۳] تیغ حنف. HYSPLIT شبیه سازی پخش مواد رادیواکتیو ناشی از بمب های هسته ای بانرم افزار. فصلنامه علمی (دفاع هوفضایی). ۱۴۰۱.
- [۴] کاویانی، معماریان، کلانتری ا. شبیه سازی انتقال، پخش جوی و نهشت آلاینده های هسته ای رها شده از یک حادثه فرضی در نیروگاه بوشهر. فیزیک زمین و فضا. ۲۰۱۷؛ ۴۳(۳):۶۳۵-۵۰.
- [۵] زاده د، مهدوی، نوروزی، غلامی، حلی ساز، ارشک. بررسی مسیرهای انتشار گرد و غبار در استان هرمزگان با استفاده از مدل HYSPLIT. مهندسی و مدیریت آبخیز. ۲۰۲۱؛ ۱۳(۲):۴۳۱-۴۴.
- [۶] محمودآبادی اسسهنز. شبیه سازی پراکنش آلاینده Cs137 از دودکش راکتور تحقیقاتی تهران در شرایط حادثه با استفاده از نرم افزار HYSPLIT. پژوهش های محیط زیست و کشاورزی ایران. ۱۳۹۴.
- [۷] علی رضا صالمند. شبیه سایی مسیرهای گردوغباری برفراز ایران. ۱۳۹۱.
- [8] Moroz BE, Beck HL, Bouville A, Simon SL. Predictions of dispersion and deposition of fallout from nuclear testing using the NOAA-HYSPLIT meteorological model. Health physics. 2010;99(2):252-69.
- [9] Beck HL, Bouville A, Moroz BE, Simon SL. Fallout deposition in the Marshall Islands from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests. Health physics. 2010;99(2):124-42.
- [10] Wendel CC, Fifield LK, Oughton DH, Lind OC, Skipperud L, Bartnicki J, et al. Long-range tropospheric transport of uranium and plutonium weapons fallout from Semipalatinsk nuclear test site to Norway. Environment International. 2013;59:92-102.
- [11] Rolph G, Ngan F, Draxler R. Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model. Journal of environmental radioactivity. 2014;136:41-55.
- [12] Suh K-S, Park K, Min B-I, Kim S, Jung Y. Development of the trajectory model for tracking release area of the radioactive materials. 2015.
- [13] Philippe S, Alzner S, Compo GP, Grimshaw M, Smith M. Fallout from US atmospheric nuclear tests in New Mexico and Nevada (1945-1962).:230711040. 2023.
- [14] Lisowski E. Potential Use of Low-Yield Nuclear Weapons in a Korean Context. Journal for Peace and Nuclear Disarmament. 2022;5:85-100.
- [15] Yao T, Thompson LG, Davis ME, Xu B, Wu G, Liang S, et al. Westerly drives long-distance transport of radionuclides from nuclear events to

glaciers in the Third Pole. Journal of Environmental Radioactivity. 2022;255:107016.

[۱۶]، وب سایت جامع هواواقلیم شناسی <https://climatology.ir>.

[۱۷] آبروش، صادق، محمدخان، ثروتی، قهرودی. مسیر یابی و بررسی روند حرکت منابع تولید گرد و غبار در شکل گیری تپه های ماسه ای با استفاده از مدل HYSPLIT (مطالعه موردی: شرق استان قم، ماسه زار جلالی). نشریه علمی-پژوهشی مرتع و آبخیزداری. ۲۰۲۱؛ ۷۴(۲): ۲۷۳-۸۶.

[۱۸] یوسفی پش. بررسی پخش مواد رادیو اکتیو از یک رآکتور هسته ای فرضی ۵MW در شرایط بهره برداری عادی و بعد از وقوع حادثه در سطح شهر تهران. ۱۳۹۲.

[19] <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.