

## شبیه‌سازی پخش مواد پرتوزا حاصل از یک حادثه فرضی برای رآکتور ABV با استفاده از کد RASCAL

محمد آزادی<sup>۱</sup>، محسن شایسته<sup>۲\*</sup>، جواد کریمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲- دانشیار ۳- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴، انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.4.4.0>

### چکیده

ارزیابی دز ناشی از گسیل مواد پرتوزا یکی از مقوله‌های اصلی ایمنی رآکتورها و تأسیسات هسته‌ای است. پخش مواد پرتوزا که ممکن است ناشی از یک حادثه در تأسیسات هسته‌ای باشد، می‌تواند سبب خطرات پرتویی برای انسان و محیط‌زیست شود، در چنین شرایطی بایستی میزان دز ارزیابی شود و در صورت لزوم اقدامات کنترلی مناسب لحاظ گردد. در این مقاله فرض شده است، رآکتور ABV که یک رآکتور ماژولار کوچک است، به‌منظور تأمین انرژی تأسیسات صنعتی در اطراف شهرستان مبارکه واقع در استان اصفهان نصب شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی پخش جوی سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ ناشی از یک حادثه فرضی ذوب قلب در این رآکتور است. مقدار رادیوایزوتوپ‌های سزیم-۱۳۴ و ۱۳۷ موجود در قلب رآکتور در زمان وقوع حادثه که در کارهای قبلی نویسندگان محاسبه شده است، به‌عنوان چشمه تابشی فرض می‌شود. سپس، با استفاده از نرم‌افزار RASCAL و با فرض اینکه مدت‌زمان رهاسازی این دو رادیوایزوتوپ یک ساعت باشد، پخش جوی آنها در دو روز بعد از حادثه و تا شعاع ۸۰ کیلومتری مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش کمیت‌های دز مؤثر کل TEDE، دز تیروئید، CEDE استنشاقی، و همچنین آلودگی سطحی این دو ایزوتوپ محاسبه و الگوی پخش آنها تا فواصل ۸۰ کیلومتری از محل وقوع حادثه ترسیم شده است.

**کلیدواژه‌ها:** رآکتور ماژولار کوچک، حادثه هسته‌ای، کد RASCAL، میزان دز، سزیم-۱۳۴، سزیم-۱۳۷

## Simulation of Radioactive Material Release Resulting from a Hypothetical Accident for ABV Reactor Using RASCAL Code

M. Azadifar<sup>1</sup>, M. Shayesteh<sup>2\*</sup>, J. Karimi<sup>3</sup>

Imam Hossein University

(Received: 2023/10/05, Revised: 2023/12/15, Accepted: 2023/12/25, Published: 2024/01/21)

### Abstract

Dose evaluation of radioactive materials is one of the main safety categories of reactors and nuclear facilities. The spread of radioactive materials, which may be caused by an accident in a nuclear facility, can cause radiation hazards to humans and the environment, in such a situation, the dose should be evaluated and, if necessary, appropriate control measures should be taken into account. In this article, it is assumed that the ABV reactor, which is a small modular reactor, has been installed in order to supply energy to industrial facilities around Mobarake city, located in Isfahan province. The main goal of this research is to investigate the atmospheric release of cesium-134 and cesium-137 caused by a hypothetical core meltdown incident in this reactor. The amount of cesium-134 and 137 radioisotopes present in the reactor core at the time of the accident, which was calculated in the previous works of the authors, is assumed as a radiation source. Then, using RASCAL software and assuming that the release time of these two radioisotopes is one hour, their atmospheric distribution has been investigated in two days after the accident and up to a radius of 80 km. In this research, total effective dose of TEDE, thyroid dose, inhaled CEDE, as well as the surface pollution of these two isotopes have been calculated and their distribution pattern up to 80 km distance from the accident site has been drawn.

**Keywords:** Small Modular Reactor, Nuclear Accident, RASCAL Code, Dose Rate, Cs-134, Cs-137

\*Corresponding Author E-mail: mshayesteh@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

انرژی هسته‌ای طی چند دهه گذشته به یک منبع قابل اعتماد به-عنوان انرژی پاک و مقرون به صرفه معرفی شده است [۱-۳]. در حال حاضر ۶۶ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به تولید انرژی در سراسر جهان است [۴]. این موضوع اهمیت انرژی‌های پاک، از جمله انرژی هسته‌ای و رآکتورهای قدرت هسته‌ای را بیشتر می‌کند. از دیگر کاربردهای انرژی هسته‌ای، استفاده از رآکتورهای هسته‌ای جهت تأمین نیروی پیشران کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و ماهواره‌ها است؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده انرژی، رآکتورهای هسته‌ای هستند [۵].

رآکتورهای هسته‌ای دارای انواع مختلفی هستند که طبق طبقه‌بندی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی<sup>۱</sup>، رآکتورهای کوچک رآکتورهایی با توان الکتریکی کمتر از ۳۰۰ مگاوات، و رآکتورهای متوسط رآکتورهایی با توان الکتریکی بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ مگاوات هستند [۶]. ویژگی‌های منحصر به فرد و مزایای رآکتورهای ماژولار کوچک SMR<sup>۲</sup> از نظر کارایی، انعطاف‌پذیری نسبت به رآکتورهای بزرگ تجاری مورد تحلیل قرار گرفته است [۷]. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که حجم کوچک و طراحی خاص ساختار قلب رآکتور، سیستم ایمنی بالا، سیستم خنک‌کننده طبیعی، قابلیت حمل و نقل آسان رآکتور و دیگر قابلیت‌های کاربردی SMRها، آن‌ها را به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای ایفای نقش در تولید انرژی پاک معرفی کرده است [۸]. رآکتور ABV که یک رآکتور ماژولار کوچک است، به‌عنوان پیشران هسته‌ای برای کشتی‌ها و زیردریایی‌ها و همچنین به‌عنوان منبع انرژی الکتریکی برای نیروگاه‌های هسته‌ای زمینی، زیرزمینی، سطحی و زیرسطحی طراحی شده است [۹]. با وجود مزایای استفاده از انرژی هسته‌ای، استفاده از این فناوری ممکن است همراه با خطرات و پیامدهای متعددی باشد. وقوع حوادث در تأسیسات هسته‌ای و یا حوادثی که در آن مواد و تشعشعات رادیواکتیو منتشر می‌شوند نظیر حوادث حمل و نقل مواد رادیواکتیو و پسماندهای رادیواکتیو با نیمه‌عمر طولانی از جمله خطرات تأسیسات هسته‌ای هستند. پیامدهای زیست محیطی و تأثیر بر آب، خاک، گیاهان و حیوانات و زنجیره غذایی از جمله پیامدهای ناشی از وقوع حوادث هسته‌ای است [۱۰]. علاوه بر این موارد، حوادث شدید هسته‌ای باعث آسیب جدی در موارد مختلف شده و دامنه آن می‌تواند تهدیدهایی را در سطوح منطقه‌ای، ملی و حتی بین‌المللی درگیر نماید [۱۱].

ایمنی مردم و محیط‌زیست در برابر چنین خطرانی، هدف اصلی ایمنی هسته‌ای و بزرگ‌ترین مسئولیت سازمان‌های ناظر بر

عملیات NPP<sup>۳</sup> است [۱۲]. شبیه‌سازی و نحوه پخش این رادیوایزوتوپ‌ها توسط مدل‌های پخش آلودگی صورت می‌گیرد. اهمیت ارزیابی پراکندگی مواد رادیواکتیو در شرایط حوادث شدیدی مانند حادثه چرنوبیل [۱۲] و فوکوشیما [۱۳] مشخص می‌شود [۱۴]. در مطالعات متعددی انتشار مواد رادیواکتیو در محیط ارزیابی شده است. تایفون کینداپ و همکارانش با استفاده از دو روش متفاوت، یکی تحلیل خط سیر و دیگری مدل ردیاب MM5 پخش و انتقال آلاینده‌های پرتوزای رها شده به جو از حادثه فرضی نیروگاه هسته‌ای متسامور ارمنستان را بر روی ترکیه بررسی کردند [۱۵]. هرناندز سیالوس و همکاران با استفاده از نرم-افزار HYSPLIT مواد پرتوزای حاصل از حادثه فوکوشیما را در نیم‌کره شمالی ردیابی کردند [۱۶]. هانگ و همکاران با استفاده از همین نرم‌افزار پخش مواد پرتوزا ساطع شده از حادثه فوکوشیما را در کره جنوبی مطالعه کردند [۱۳]. لیو و همکاران مسیر انتقال مواد پرتوزای رها شده از حادثه فوکوشیما را در شیآن چین با استفاده از نرم‌افزار HYSPLIT بررسی کردند [۱۷].

## ۲. روش تحقیق

مدل‌سازی یک حادثه هسته‌ای با استفاده از دو روش انجام می‌شود: روش اول، مدل‌سازی عملیاتی است که یک حادثه فرضی در نظر گرفته می‌شود و در آن فقط می‌توان از داده‌های تقریبی و فرضیات معقول استفاده کرد. روش دوم، مدل‌سازی پس از وقوع حادثه واقعی است، در جایی که می‌توان از اندازه‌گیری‌ها و داده‌های واقعی استفاده کرد [۱۸]. در این پژوهش از روش اول استفاده می‌شود، یعنی یک حادثه فرضی برای یک رآکتور ABV در نظر گرفته شده است. کمیت‌های مرتبط با پخش مواد پرتوزا که تأثیر قابل‌توجهی بر ارزیابی دز دارند و باید در محاسبات در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از: زمان رهاسازی، مدت انتشار، ارتفاع رهاسازی، حالت فیزیکی، اندازه ذرات، اکتیویته، نیمه‌عمر و نوع مواد پرتوزای آزاد شده از تأسیسات که به نوع رآکتور، عملکرد ساختارهای حفاظ و نوع حادثه بستگی دارد؛ بنابراین مشخصات منبع انتشار، نوع حادثه و نوع نیروگاه حائز اهمیت است. مواد رادیواکتیو بلافاصله بعد از رهاشدن تحت تأثیر شرایط جوی قرار خواهند گرفت، از این رو داده‌های هواشناسی محلی برای ارزیابی پخش مواد رادیواکتیو مورد نیاز است؛ لذا با داشتن اطلاعات دقیق هواشناسی، خروجی‌های پژوهش نیز دارای صحت بیشتری خواهند بود [۱۹].

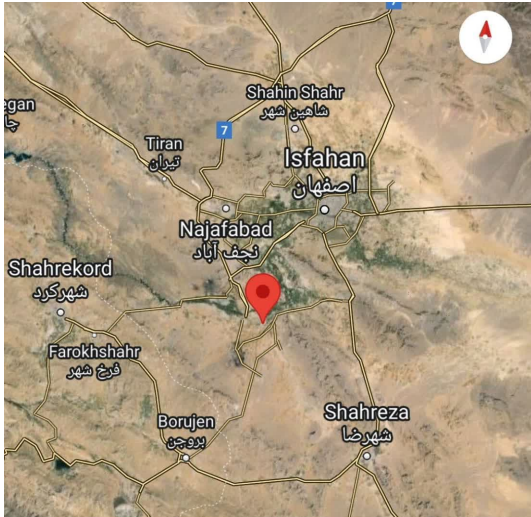
## ۲-۱. رآکتور ABV

رآکتور ABV، یک رآکتور آب سبک تحت فشار است و خنک‌کردن مدار اولیه آن با جریان طبیعی انجام می‌شود. تجربه بلندمدت در طراحی و ساخت تأسیسات هسته‌ای شرکت سازنده روسی، مبنای

<sup>1</sup>International Atomic Energy Agency

<sup>2</sup>Small Modular Reactors

<sup>3</sup>Nuclear Power Plants



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی شهرستان مبارکه

## ۲-۲. منبع انتشار

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که چگونگی پخش ذرات پرتوزا در جو را پس از حادثه تعیین می‌کند، نوع مواد پرتوزایی است که از منبع انتشار آزاد می‌شود [۱۸]. در این پژوهش در اولین گام برای انجام محاسبات دو ایزوتوپ سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ که از مهم‌ترین ایزوتوپ‌های تولیدی در طول عملکرد این راکتور هستند، برای بررسی پخش در جو اطراف نیروگاه انتخاب شدند. نیمه‌عمر و اکتیویته این دو رادیوایزوتوپ در زمان حادثه در جدول (۲) نشان‌داده شده است [۲۴، ۲۳، ۲۱]. در این پژوهش فرض شده است رهاسازی سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ در مدت زمان یک ساعت بلافاصله پس از وقوع حادثه و ذوب قلب صورت می‌گیرد و حادثه-ای که برای راکتور رخ می‌دهد یک حادثه LOCA است که باعث می‌شود قلب راکتور ذوب گردد و ۹۰ درصد مواد داخل قلب وارد محفظه ایمنی شده [۹] و این مواد به فضای اطراف راکتور نشت یابند.

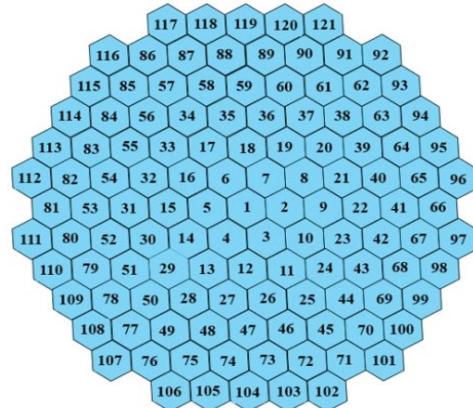
**جدول ۲.** اکتیویته سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ موجود در قلب راکتور هنگام وقوع حادثه فرضی

ایزوتوپ	نیمه‌عمر	حالت واپاشی	اکتیویته (کوری)
سزیم-۱۳۴	۲ سال	$\beta^-$	$5/542 \times 10^5$
سزیم-۱۳۷	۳۰ سال	$\beta^-$	$4/274 \times 10^5$

## ۲-۳. داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی در مدل‌سازی پخش مواد پرتوزا بسیار مهم است. برای مدل‌سازی دقیق پراکندگی جوی بایستی داده‌های مکانی و زمانی پارامترهای هواشناسی، در مدل‌سازی اعمال شود. شرایط جوی مانند سرعت و جهت باد از مهم‌ترین پارامترها در تعیین توزیع دز در مناطق اطراف است. به‌عنوان مثال، جهت باد تأثیر عمده‌ای بر نحوه توزیع مواد رادیواکتیو دارد و سبب می‌شود بیشترین غلظت در جهت و فاصله خاصی از چشمه تابشی حادثه

طراحی راکتور ABV است. طراحی راکتور ABV با استفاده از تجربه عملیاتی راکتورهای نوع VVER و دستاوردهای جدید در زمینه ایمنی نیروگاه هسته‌ای توسعه داده شده است [۲۰]. هدف اصلی از ساخت این راکتور ایجاد منابع انرژی کوچک بر اساس فناوری‌های جدید و اثبات شده است [۲۱]. در شکل (۱) نمایی از مجتمع‌های سوخت قلب راکتور ABV نشان‌داده شده است.



شکل ۱. نمایی از مجتمع‌های سوخت قلب راکتور ABV [۲۲]

اندازه کوچک این راکتور، حمل‌ونقل آسان به سایت را فراهم می‌کند. ایمنی حین عملیات یکی از ویژگی‌های مهم این راکتور است. مشخصات اصلی این راکتور در جدول (۱) مشاهده می‌شود. ویژگی‌های راکتور ABV فرصتی را برای ایجاد عملیات ایمن و کاربردهای چندمنظوره فراهم می‌کند، بسته به نیازهای منطقه محل استقرار، این راکتور می‌تواند برق تولید کند یا هم‌زمان حرارت و توان تولید کند و یا به‌عنوان شیرین‌کننده آب دریا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از این راکتور می‌توان در تولید رادیوایزوتوپ‌ها برای کاربردهای صنعتی و پزشکی استفاده کرد.

جدول ۱. مشخصات راکتور ABV [۲۰]

مقدار	کمیت
PWR	نوع راکتور
۴۵	توان حرارتی (مگاوات)
۱۱	توان الکتریکی (مگاوات)
۱۲۱	تعداد مجتمع سوخت
گردش طبیعی	سیستم خنک‌کننده
دی‌اکسید اورانیوم + silumin	نوع سوخت
۱۶/۵ درصد	غنای سوخت
آب سبک	خنک‌کننده
آب سبک	کندکننده
چرخه توربین بخار	نوع چرخه
۷/۵	ارتفاع کلی (متر)
۲/۶	قطر (متر)
۷۵	وزن عملیاتی (تن)
آلیاژ زیرکونیوم	ساختارهای مجموعه سوخت
آلیاژ تیتانیوم	سیستم لوله ژنراتور بخار

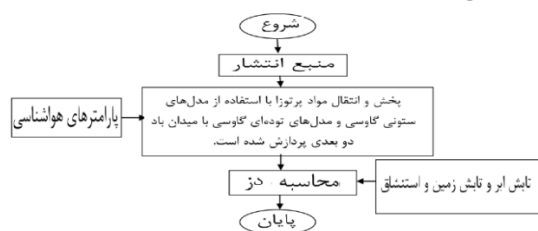
مورد نیاز است، از سایت هواشناسی accuweather دریافت شده است. این داده‌ها مربوط به ۴۸ ساعت بعد از حادثه فرضی است و هر سه ساعت یکبار این اطلاعات تازه‌سازی شده است. جزئیات داده‌های هواشناسی دریافت شده در جدول (۳) قابل مشاهده است لازم به ذکر است که داده‌های هواشناسی می‌تواند در فصول مختلف به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر کنند.

به وجود آید. موقعیت جغرافیایی یک عامل مهم در ارزیابی دز دریافتی توسط فرد است. فردی که به نقطه منبع نزدیک‌تر است معمولاً بیشتر در معرض خطر قرار دارد، اما خطر واقعی تا حد زیادی به شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد. برای مثال، عاملی مانند باد ممکن است منجر به غلظت بالاتر رادیونوکلئیدها در مکان‌های دورتر از حادثه شود [۲۵]. اطلاعات هواشناسی که در این مطالعه

جدول ۳. داده‌های هواشناسی شهرستان مبارکه طی ۴۸ ساعت بعد از حادثه

تعداد	تاریخ	ساعت	نقطه شبم (C <sup>0</sup> )	فشار هوا (mb)	دما (C <sup>0</sup> )	سرعت باد (m/s)	جهت باد(deg)
۱	07/06/2023	00:00	0	1013	26	4.72	315
۲	07/06/2023	03:00	2	1016	25	3.88	335
۳	07/06/2023	06:00	2	1016	25	3.6	315
۴	07/06/2023	09:00	1	1014	28	1.38	360
۵	07/06/2023	12:00	2	1016	32	4.16	335
۶	07/06/2023	15:00	0	1016	35	2.77	335
۷	07/06/2023	18:00	2	1018	35	1.38	270
۸	07/06/2023	21:00	2	1016	30	2.5	180
۹	07/07/2023	00:00	0	1018	30	1.94	270
۱۰	07/07/2023	03:00	1	1015	22	3.33	245
۱۱	07/07/2023	06:00	2	1017	22	4.16	315
۱۲	07/07/2023	09:00	2	1013	29	4.72	270
۱۳	07/07/2023	12:00	4	1015	32	4.16	315
۱۴	07/07/2023	15:00	4	1013	34	5	292
۱۵	07/07/2023	18:00	2	1014	36	5.55	229
۱۶	07/07/2023	21:00	2	1016	31	4.1	315
۱۷	07/08/2023	00:00	2	1016	27	3.6	315

زمین (با فرض قرارگرفتن ۴ روزه در معرض تابش زمین). این نرم‌افزار در محاسبه دز ناشی از رادیونوکلئیدهای رسوب شده فرض می‌کند که افراد در خارج از هرگونه پناهگاهی هستند. شکل (۳) نمودار جریان فرآیند، استفاده از ابزار منبع به دز انتشار را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودار فرایند ابزار منبع به دز انتشار کد RASCAL

## ۲-۵. روش محاسبات RASCAL

این کد برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها، از مدل‌های پخش استفاده می‌کند. این مدل‌ها، پخش و رسوب مواد پرتوزا از منبع در محیط را تخمین می‌زنند، مدل گاوسی یکی از متداول‌ترین

## ۲-۴. نرم‌افزار RASCAL

کد RASCAL [۲۶] توسط مرکز عملیات اضطراری کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای ایالات متحده<sup>۱</sup> توسعه داده شده است. این کد یک ابزار ارزیابی سریع برای پیش‌بینی دز در شرایط اضطراری است. محاسبات نرم‌افزار RASCAL با استفاده از معادلات بروز و دارای صحت انجام می‌شود و محاسبات آن بر مبنای بدترین حالت انتشار در نظر گرفته شده است. یکی از ابزارهای این کد، منبع به دز<sup>۲</sup> است که برای ارزیابی اثرات احتمالی انتشار، یا در مراحل یک حادثه شدید استفاده می‌شود [۲۷]. میزان رهاسازی وابسته به زمان است و ورودی یک مدل پراکندگی جوی را فراهم می‌کند. مدل پراکندگی جوی، غلظت رادیونوکلئیدها را در هوا و روی زمین تخمین می‌زند و از غلظت‌های محاسبه شده، برای تخمین دز استفاده می‌کند. مسیرهای پخش مواد پرتوزا عبارت‌اند از: تابش ابر، دز استنشاقی و تابش

<sup>1</sup> United States Nuclear Regulatory Commission

<sup>2</sup> Source Term to Dose

سازمان‌های هواشناسی دریافت و در نرم‌افزار RASCAL اعمال گردید که در جدول (۳) قابل مشاهده است. در کد RASCAL پخش سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ برای ۴۸ ساعت بررسی شده است. رهاسازی این رادیوایزوتوپ‌ها تا یک ساعت پس از وقوع حادثه فرض شده است. هدف اصلی این مطالعه محاسبه دز مؤثر دریافتی توسط فردی است که در معرض مواد پرتوزا منتشر شده قرار می‌گیرد [۲۹].

برای نمایش دقیق‌تر اطلاعات استخراج شده قابلیت خوشه-بندی RASCAL روی نقشه اعمال شده است، این قابلیت باعث شده است که زوایای نقشه‌های جغرافیایی برای نمایش بهتر به قسمت‌های مساوی تقسیم شود [۳۰]. در خوشه‌بندی، مسیرهایی که در یک گروه قرار می‌گیرند حداقل اختلاف را با یکدیگر خواهند داشت. خوشه‌بندی باعث می‌شود تا تجزیه و تحلیل خروجی‌های مسیر آسان‌تر و سریع‌تر باشد. نقشه نشان داده شده در شکل (۴)، پراکندگی و مسیری را برای میزان دز خارجی نشان می‌دهد. در شکل (۴) میزان دز خارجی در حالت‌های پنجره باز و پنجره بسته محاسبه و برای دو فاصله شعاعی تا ۸ و ۸۰ کیلومتری رسم شده است. میزان دز خارجی در حالت پنجره باز عبارت است از میزان دز دریافتی پرتوی گامای خارجی که ناشی از تابش زمین و تابش ابر است در حالی که تمام پنجره‌ها باز است.

در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب میزان دز خارجی دریافتی برای حالت پنجره باز رسم شده است. طبق این شکل‌ها جهت باد یک عامل تعیین‌کننده در پخش ایزوتوپ‌های سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ است. میزان دز در جهت ۳۲۰ درجه و تا فواصل دور به بیش از ۱ mSv/h نیز می‌رسد که در شکل (۴-الف و ۴-ب) با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. دیگر مقادیر میزان دز خارجی نیز با رنگ‌های نارنجی، زرد، آبی و خاکستری در این دو شکل مشخص شده است.

در شکل‌های (۴-ج و ۴-د) نیز میزان دز خارجی دریافتی در حالت پنجره بسته نشان داده شده است، میزان دز خارجی در حالت پنجره بسته عبارت است از میزان دز دریافتی پرتوی گامای خارجی که ناشی از تابش زمین و تابش ابر است در حالی که تمام پنجره‌ها بسته است. مشابه با حالت پنجره باز، میزان دز در یک جهت خاص تا فواصل ۸۰ کیلومتری به بیش از ۱ mSv/h نیز می‌رسد که در شکل (۴-ج و ۴-د) با رنگ قرمز مشخص شده است. مقادیر میزان دز خارجی دیگر نواحی نقاط نیز با رنگ‌های نارنجی، زرد، آبی و خاکستری مشخص شده است.

آن‌ها است. کد RASCAL از دو مدل توده‌ای گاوسی<sup>۱</sup> و مدل ستونی گاوسی<sup>۲</sup> استفاده می‌کند. مدل توده‌ای گاوسی معادله (۱) برای فواصل طولانی‌تری که تغییرات زمانی یا مکانی و شرایط هواشناسی قابل توجه است استفاده می‌شود. در یک مختصات دکارتی با محورهای X و Y در یک صفحه افقی و Z در یک صفحه عمودی، غلظت‌های نرمال شده با معادله (۱) به دست می‌آیند [۲۹]:

$$\chi(x,y,z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_0}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (1)$$

$\chi(x,y,z)$  غلظت در فاصله  $(x,y,z)$  از مرکز توزیع غلظت  $(x_0,y_0,z_0)$  مقدار مواد آزاد شده و  $\sigma$  پارامتر انحراف است. مدل ستونی گاوسی (معادله (۲)) در نزدیکی نقطه رهاسازی استفاده می‌شود، یعنی زمانی که تازه مواد پرتوزا در محیط اطراف پخش شده و فاصله‌ی زیادی را طی نکرده‌اند. برای مدل ستونی گاوسی، در نزدیکی یک نقطه رهاسازی، مفروضات عبارتند از: الف) شرایط آب‌وهوایی نسبت به منبع انتشار ثابت است. ب) شرایط آب‌وهوایی در حالت افقی، همگن و ثابت است. ج) شرایط آب و هوایی طی مدت انتقال مواد تغییر نمی‌کند [۲۷].

$$\frac{\chi(x,y,z)}{Q} = \frac{F_y F_z}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad (2)$$

که X میانگین غلظت ماده پرتوزا، Q میزان انتشار ماده پرتوزا،  $F_y, F_z$  ضریب‌های عمودی و افقی،  $\sigma_y, \sigma_z$  پارامترهای انحراف افقی و عمودی و u سرعت باد است. روابط پارامترهای انحراف مورد استفاده در کدهای مرکز عملیات اضطراری کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای ایالات متحده به صورت زیر است:

$$\sigma_y = a_y x^{0.9031} \quad (3)$$

$$\sigma_z = a_z(x) \times x^{b_z(x)} + c_z(x) \quad (4)$$

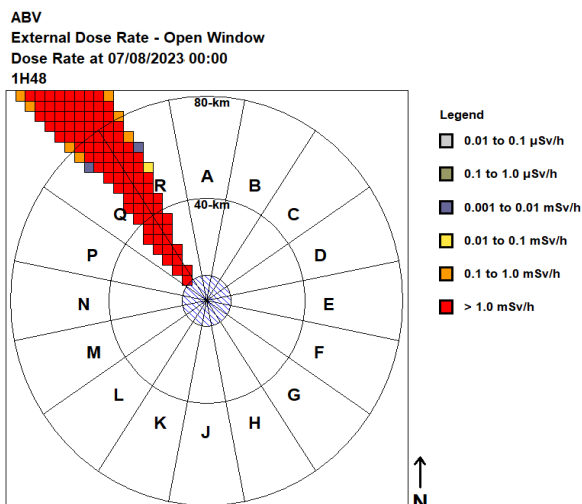
در این روابط، x فاصله از نقطه رهاسازی (بر حسب متر)،  $a_y$  تابعی از کلاس پایداری، و  $a_z, b_z, c_z$  مقادیر تجربی هستند که تابعی از کلاس پایداری و فاصله هستند. مقادیر ثابت پارامترهای پراکندگی جوی در مرجع [۲۷] قابل مشاهده است.

### ۳. نتایج و بحث

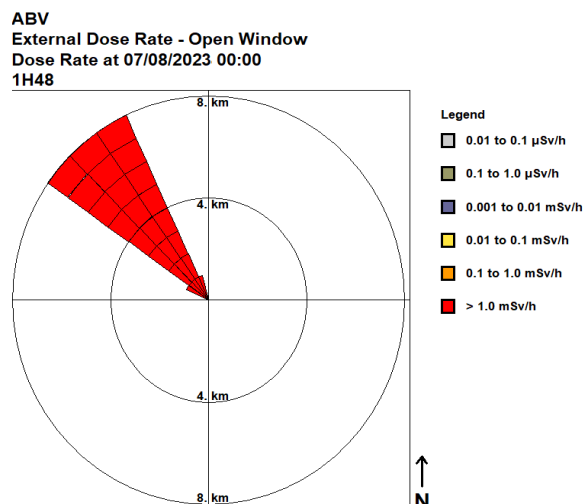
ابتدا نوع و مقدار رادیوایزوتوپ‌های مختلف موجود در قلب این راکتور مشخص گردید [۲۱، ۲۳، ۲۴]، در این پژوهش سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ مورد نظر است و اطلاعات آن در جدول (۲) بیان شده است. سپس با فرض وقوع یک حادثه برای راکتور ABV در یک مکان مشخص در شهرستان مبارکه، پخش این رادیوایزوتوپ‌ها در محیط اطراف محل حادثه تا شعاع ۸۰ کیلومتری بررسی شد. اطلاعات هواشناسی محل مورد نظر نیز در زمان وقوع حادثه از

<sup>1</sup> Gaussian Puff Model

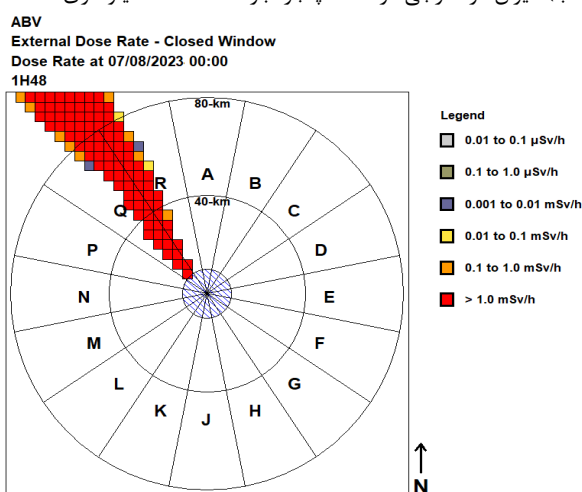
<sup>2</sup> Gaussian Plume Model



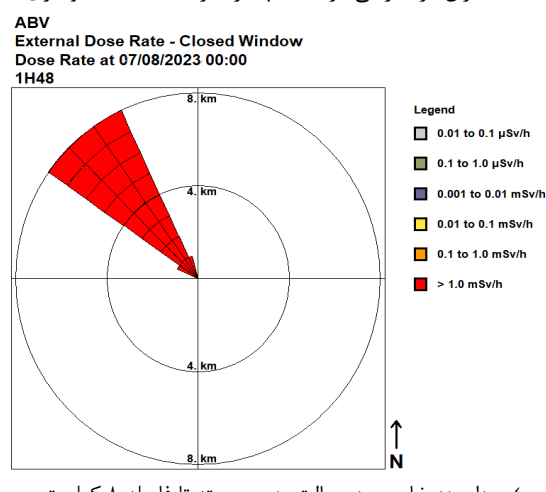
(ب) میزان دز خارجی در حالت پنجره باز تا فاصله ۸۰ کیلومتری



(الف) میزان دز خارجی در حالت پنجره باز تا فاصله ۸ کیلومتری



(د) میزان دز خارجی در حالت پنجره بسته تا فاصله ۸۰ کیلومتری

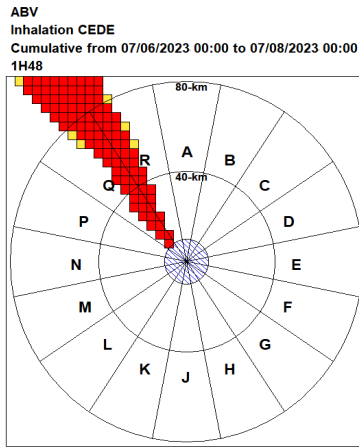


(ج) میزان دز خارجی در حالت پنجره بسته تا فاصله ۸ کیلومتری

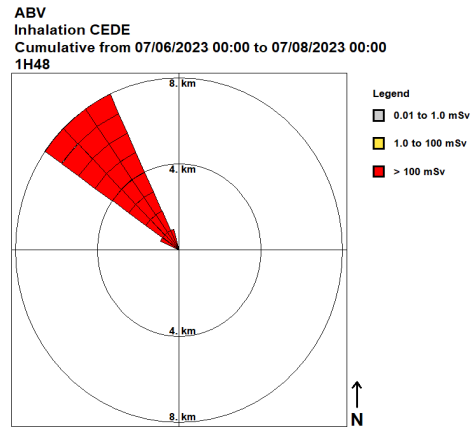
شکل ۴. دز ناشی از پخش سزیم-۱۳۷ و سزیم-۱۳۴

۵۰ mSv شود، در شرایط محیطی عادی جمعیت عمومی باید آن مکان را تخلیه کنند و گروه‌های پرخطر (گروه‌هایی که خطر تخلیه بالاتر از حد متوسط دارند؛ مثلاً افرادی که آماده نیستند نقل مکان کنند) باید پناه بگیرند. اما در شرایط محیطی خطرناک (شرایط محیطی که حضور فرد در آن ریسک محسوب می‌شود نسبت به شرایط محیطی عادی) هر دو گروه جمعیت عمومی و گروه‌های پرخطر باید در مکان مناسب پناه بگیرند. در مناطقی که دز بحرانی تیروئید بیش از ۲۵۰ mSv شود در شرایط محیطی عادی هر دو گروه جمعیت عمومی و گروه‌های پرخطر باید مکان را تخلیه کنند. اما در شرایط محیطی خطرناک گروه‌های پرخطر باید در مکان مناسب پناه بگیرند و جمعیت عمومی باید مکان را تخلیه کنند. در مناطقی که دز بحرانی تیروئید بیش از ۵۰۰ mSv شود تمام افراد در شرایط محیطی عادی و شرایط محیطی خطرناک باید مکان را تخلیه کنند [۳۲].

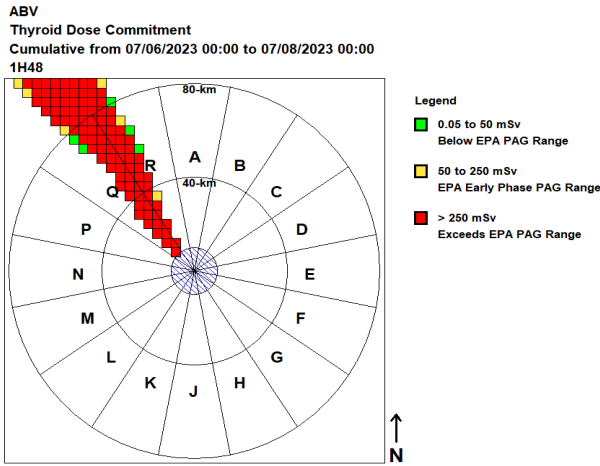
کمیت‌های دز استنشاقی و دز تیروئید و دز مؤثر کل طی ۴۸ ساعت بعد از حادثه در شکل (۵) قابل مشاهده است. دز استنشاقی ناشی از تنفس ذرات پرتوزا موجود در هوا است. طبق شکل ۵-الف مقدار دز استنشاقی در اطراف محل حادثه تا شعاع ۸ کیلومتری در بعضی نواحی به بیش از ۱۰۰ mSv می‌رسد. بر اساس شکل (۵-ب) تا شعاع ۸۰ کیلومتری نیز در بعضی نواحی مقدار دز استنشاقی به بیش از ۱۰۰ mSv می‌رسد که با رنگ قرمز در شکل‌های (۵-الف و ۵-ب) نشان داده شده است، دیگر مقادیر دز استنشاقی با رنگ‌های زرد و خاکستری قابل مشاهده است. روند دز تیروئید نیز در شکل‌های (۵-ج و ۵-د) نشان داده شده است. دز تیروئید ناشی از مجموع رادیونوکلیدهای رها شده است که آسیب ناشی از تشعشع مواد پرتوزا بر غده تیروئید را ارزیابی می‌کند [۳۱]. طبق این دو شکل (۵-ج) به‌طور کلی تا شعاع ۸۰ کیلومتری مقدار این دز در برخی نواحی بیش از ۲۵۰ mSv است. در مناطقی که دز تیروئید بیش از



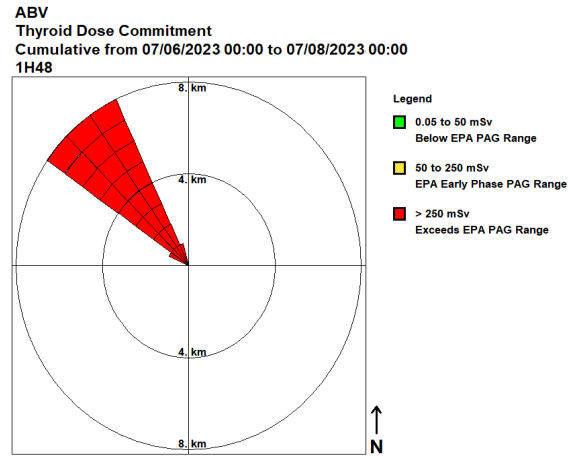
(ب) دز استنشاقی تا فاصله ۸۰ کیلومتری



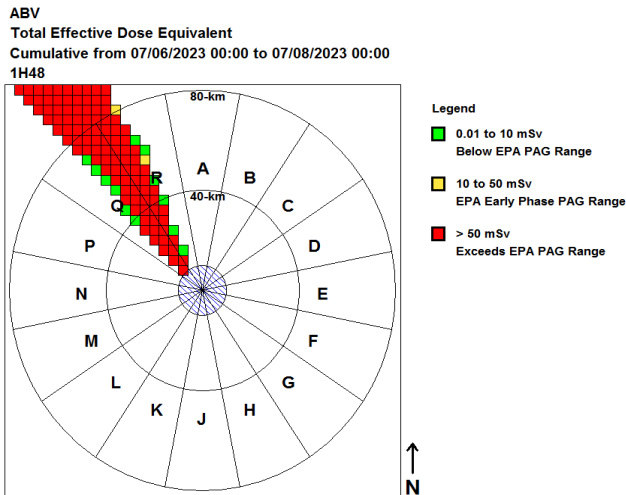
(الف) دز استنشاقی تا فاصله ۸ کیلومتری



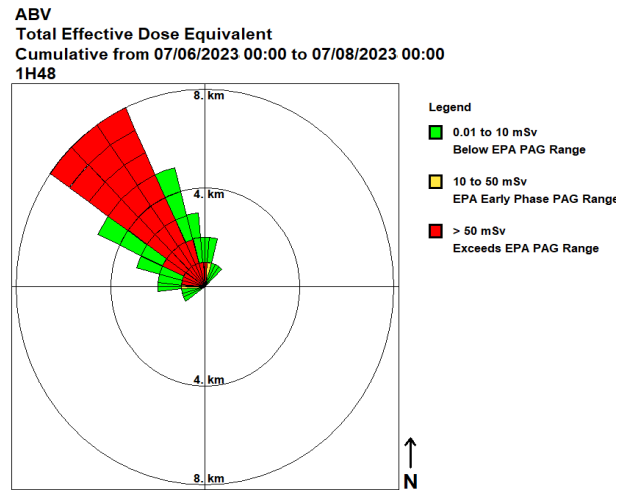
(د) دز تیروئید تا فاصله ۸۰ کیلومتری



(ج) دز تیروئید تا فاصله ۸ کیلومتری



(و) دز معادل مؤثر کل تا فاصله ۸۰ کیلومتری



(ه) دز معادل مؤثر کل تا فاصله ۸ کیلومتری

شکل ۵. دز خارجی ناشی از پخش سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷

شکل ۵-ه در نواحی نزدیک به محل وقوع حادثه در بعضی نواحی مقدار دز به بیش از ۵۰ mSv نیز می‌رسد که حد بحرانی EPA<sup>۲</sup> است [۳۲] و با رنگ قرمز نشان داده شده

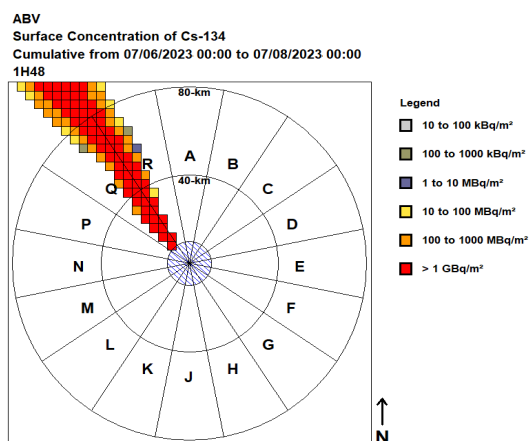
دز معادل مؤثر کل<sup>۱</sup> نیز در شکل‌های ۵-ه و ۵-و نشان داده شده است. دز معادل مؤثر کل مجموع دز استنشاقی و دز خارجی ناشی از تابش ابر و تابش زمین است [۳۱]. طبق

<sup>۲</sup> Environmental Protection Agency

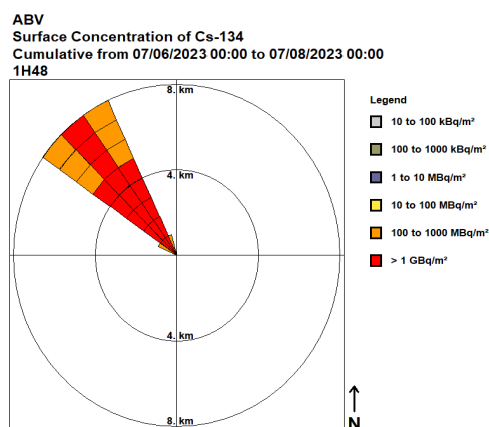
<sup>۱</sup> Total Effective Dose Equivalent

در شکل‌های (۶) غلظت سطحی سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ نشان داده شده است. غلظت سطحی یک ایزوتوپ، مقدار رسوب و آلودگی سطحی آن ایزوتوپ است که به صورت تابعی از زمان در نقاط مختلف محاسبه می‌شود [۳۱]. طبق شکل ۶-الف مقدار غلظت سطحی سزیم-۱۳۴ در اطراف محل حادثه تا شعاع ۸ کیلومتری در بعضی نواحی به بیش از  $1\text{GBq/m}^2$  می‌رسد. طبق شکل (۶-ب) نیز تا شعاع ۸۰ کیلومتری در بعضی نواحی مقدار غلظت سطحی سزیم-۱۳۴ بیش از  $1\text{GBq/m}^2$  است. روند پخش غلظت سطحی سزیم-۱۳۷ نیز در شکل‌های (۶-ج و ۶-د) نشان داده شده است. طبق شکل (۶-ج و ۶-د) به طور کلی تا شعاع ۸ و ۸۰ کیلومتری مقدار غلظت سطحی در برخی نواحی به بیش از  $1\text{GBq/m}^2$  می‌رسد. کد RASCAL ناشی از تابش زمین را بر اساس تشعشع مواد پرتوزای رسوب شده بر روی زمین محاسبه می‌کند. ضریب تصحیح مربوط به ناهمواری زمین و نیز واپاشی و تولید رادیونوکلئیدهای جدید نیز در محاسبات لحاظ می‌شود [۳۱].

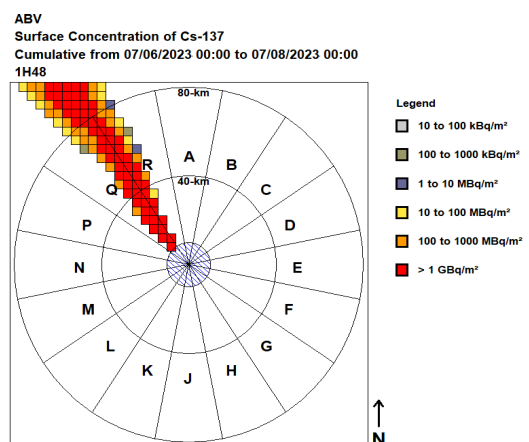
است. طبق شکل ۵-و در برخی نواحی و در فواصل تا ۸۰ کیلومتر نیز این دز به بیش از  $50\text{mSv}$  می‌رسد. در مناطقی که دز معادل موثر کل بیش از  $10\text{mSv}$  شود (مناطق زرد و قرمز رنگ) در شرایط محیطی عادی، جمعیت عمومی باید آن مکان را تخلیه کنند و گروه‌های پرخطر باید پناه بگیرند. اما در شرایط محیطی خطرناک (شرایط محیطی که در حضور فرد در آن ریسک محسوب می‌شود نسبت به شرایط محیطی عادی) هر دو گروه جمعیت عمومی و گروه‌های پرخطر باید در مکان مناسب پناه بگیرند. اما در شرایط محیطی خطرناک (مناطق قرمز رنگ) در شرایط محیطی عادی هر دو گروه جمعیت عمومی و گروه‌های پرخطر باید مکان را تخلیه کنند. اما در شرایط محیطی خطرناک گروه‌های پرخطر باید در مکان مناسب پناه بگیرند و جمعیت عمومی باید مکان را تخلیه کنند. در مناطقی که دز معادل موثر کل بیش از  $100\text{mSv}$  شود تمام افراد در شرایط محیطی عادی و شرایط محیطی خطرناک باید مکان را تخلیه کنند [۳۲].



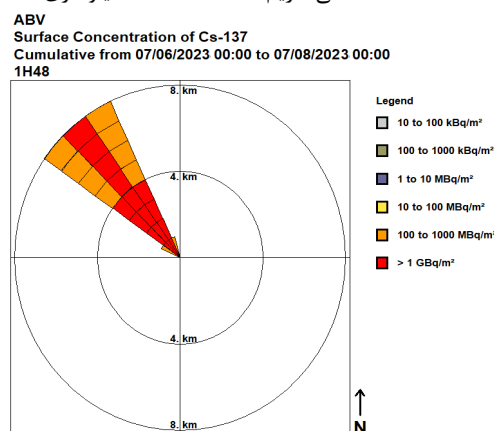
ب) غلظت سطحی سزیم-۱۳۴ تا فاصله ۸۰ کیلومتری



الف) غلظت سطحی سزیم-۱۳۴ تا فاصله ۸ کیلومتری



د) غلظت سطحی سزیم-۱۳۷ تا فاصله ۸۰ کیلومتری



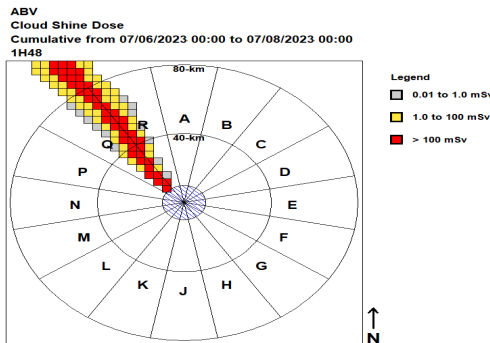
ج) غلظت سطحی سزیم-۱۳۷ تا فاصله ۸ کیلومتری

شکل ۶. غلظت سطحی ناشی از پخش سزیم-۱۳۷ و سزیم-۱۳۴ در ۴۸ ساعت پس از حادثه

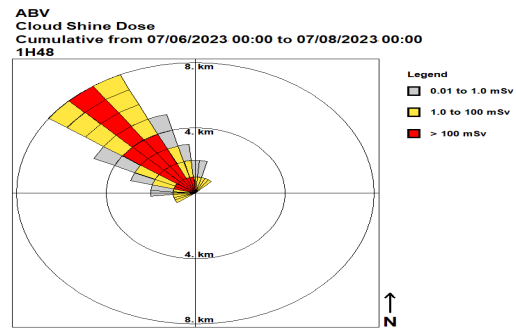
در شکل‌های (۷) توزیع کمیت‌های دز تابش‌ابر، دز تابش‌زمین و دز چهار روزه تابش‌زمین نشان داده شده است. تابش‌ابر اصطلاحی است که مربوط به تشعشعات ناشی از مواد پرتوزای رسوب شده روی ابر است که در بیشتر مواقع مربوط به تابش‌های  $\gamma$  و  $\beta$  موجود در ابر آلاینده است [۳۱]. مقدار دز تجمعی تابش‌ابر در فاصله زمانی دو روزه در شکل (۷-الف) تا فاصله ۸ کیلومتری مشاهده می‌شود، در برخی از نواحی مقدار این کمیت به بیش از 100 mSv می‌رسد. همچنین در شکل (۷-ب) دز تابش‌ابر تا فاصله ۸۰ کیلومتری نشان داده شده است که در بعضی نقاط بیش از 100 mSv است.

در شکل (۷-ج) مقدار دز تابش‌زمین تا فاصله ۸ کیلومتری نشان شده است، در برخی مناطق مقدار این دز به بیش از ۱۰۰ mSv می‌رسد. شکل (۷-د) مقدار این دز را تا فاصله ۸۰ کیلومتری نشان می‌دهد، مقدار این دز نیز در برخی از نواحی بیش از ۱۰۰ mSv است. دز چهارروزه تابش‌زمین ناشی از فعالیت مواد پرتوزای رسوب شده روی سطح زمین از آغاز انتشار طی یک دوره ۹۶ ساعته است و تولید و تابش هسته دختر را نیز محاسبه می‌کند ولی فعالیت مواد پرتوزا در جو را در نظر نمی‌گیرد [۳۱]. در شکل‌های (۷-ه و ۷-و) مقدار دز چهار روزه تابش‌زمین نشان داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود این دز در برخی مناطق به بیش از 100 mSv می‌رسد.

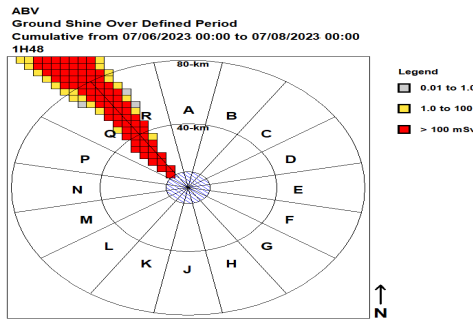
شکل ۷. مقادیر دز تجمعی تابش‌ابر و تابش‌زمین



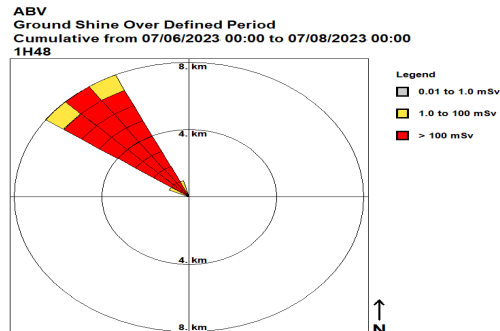
(ب) دز تابش ابر تا فاصله ۸۰ کیلومتری



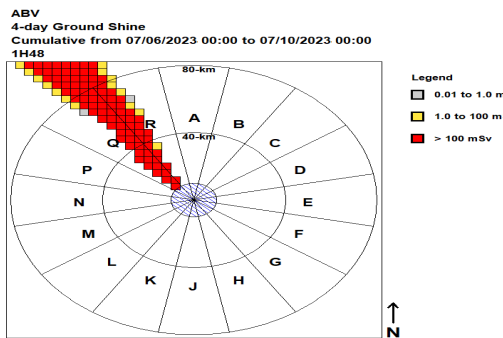
(الف) دز تابش ابر تا فاصله ۸ کیلومتری



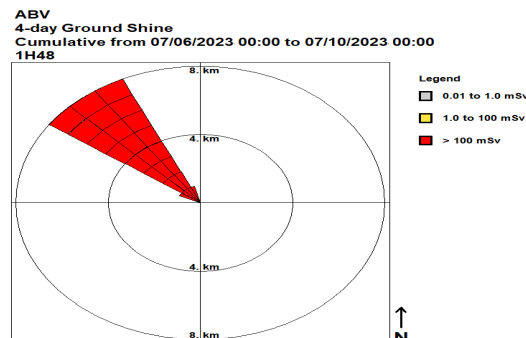
(د) دز تابش زمین تا فاصله ۸۰ کیلومتری



(ج) دز تابش زمین تا فاصله ۸ کیلومتری



(و) دز چهارروزه تابش زمین تا فاصله ۸۰ کیلومتری



(ه) دز چهارروزه تابش زمین تا فاصله ۸ کیلومتری

## ۶. نتیجه‌گیری

با فرض وقوع یک حادثه فرضی در رآکتور هسته‌ای ABV و اعمال شرایط آب‌وهوایی در نرم‌افزار RASCAL، پخش دو رادیوایزوتوپ سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ به مدت ۴۸ ساعت در هوا بررسی و مقادیر دزهای مختلف این دو ایزوتوپ و میزان دز آنها محاسبه شد. میزان دز خارجی در حالت‌های پنجره بسته و پنجره باز تا شعاع ۸۰ کیلومتری در برخی نواحی در جهت وزش باد به بیش از ۱ mSv/h می‌رسد. مقدار دز استنشاقی CEDE تا فاصله ۸۰ کیلومتری در برخی از نواحی بیش از ۱۰۰ mSv است. مقدار دز تیروئید در برخی نواحی در جهت وزش باد تا شعاع ۸۰ کیلومتری به بیش از ۲۵۰ mSv نیز می‌رسد و لازم است اقدامات حفاظتی لازم برای افراد ساکن در این نواحی انجام گیرد. دز معادل مؤثر کل تا فاصله ۸۰ کیلومتری از محل حادثه در نواحی که در جهت وزش باد قرار دارند بیش از ۵۰ mSv است. دز تابش ابر، تابش زمین و دز چهارروزه تابش زمین تا شعاع ۸۰ کیلومتری در مناطقی که در معرض وزش باد قرار داشته باشند بیش از ۱۰۰ mSv است. مقدار غلظت سطحی سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ در نواحی که در جهت باد قرار داشته باشند تا فاصله ۸۰ کیلومتری به بیش از ۱ GBq/m<sup>2</sup> می‌رسد. نکته موردتوجه در این نتایج اهمیت داده‌های هواشناسی از جمله جهت و سرعت باد است. مقادیر دز این کمیات باتوجه به آثار آنها بر محیط‌زیست و سلامتی افراد ساکن در این مناطق، تعیین‌کننده هرگونه تصمیم‌گیری در خصوص مدیریت شرایط به وجود آمده است که نیاز به تحلیل و بررسی جداگانه‌ای دارد.

## ۷. مراجع

- [8] Hussein, E. M. A. "Emerging Small Modular Nuclear Power Reactors: A Critical Review"; *Phys. Open* 2020 , 5. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2020.100038>.
- [9] Agency, I. A. E. Status of Small Reactor Designs Without on-Site Refuelling. International Atomic Energy Agency, 2007. <https://doi.org/10.1115/ICONE14-89318>.
- [10] Mialle, S.; Richter, S.; Truyens, J.; Hennessy, C.; Jacobsson, U.; Aregbe, Y. "Certification of the Uranium Hexafluoride (Uf6) Isotopic Composition: the IRMM-019 to IRMM-029 series"; *Certif. Rep.* 2014.
- [11] Oe, M.; Takebayashi, Y.; Sato, H.; Maeda, M. "Mental Health Consequences of the Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima Nuclear Disasters: A Scoping Review"; *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 7478. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147478>
- [12] Alexakhin, R. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group "Environment"; International Atomic Energy Agency, 2006.
- [13] Hong, G. H. "Radioactive Impact in South Korea From the Damaged Nuclear Reactors in Fukushima: Evidence of Long and Short Range Transport"; *J. Radiol. Prot.* 2012 , 32, 397.
- [14] Draxler, R. "World Meteorological Organization's Model Simulations of the Radionuclide Dispersion and Deposition From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident"; *J. Environ. Radioact.* 2015, 139, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.09.014>.
- [15] Kindap, T.; Turuncoglu, U. U.; Chen, S.; Unal, H. A.; Karaca, M. "Potential Threats From a Likely Nuclear Power Plant Accident: A Climatological Trajectory Analysis and Tracer Study"; *Water Air. Soil Pollut.* 2009, 198, 393-405.
- [16] Hernández-Ceballos, M. A. "Tracking the Complete Revolution of Surface Westerlies Over Northern Hemisphere Using Radionuclides Emitted From Fukushima"; *Sci. Total Environ.* 2012, 438, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.024>
- [17] Liu, L. "Monitoring of Atmospheric Radionuclides From the Fukushima Nuclear Accident and Assessing Their Impact on Xi'an, China"; *Chinese Sci. Bull.* 2013, 58, 1585-1591. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5521-4>
- [18] Dvorzhak, A.; Puras, C.; Montero, M.; Mora, J. C. "Spanish Experience on Modeling of Environmental Radioactive Contamination due to Fukushima Daiichi NPP Accident Using JRODOS"; *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 11887-11895.
- [19] Awan, S. E.; Mirza, N. M.; Mirza, S. M. "Kinetic Study of Fission Product Activity Released Inside Containment Under Loss of Coolant Transients in a Typical Mtr System"; *Appl. Radiat. Isot* 2012, 70, 2711-2719. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.08.002>.
- [20] ANNEX, V.; OKBM, A. B. V. "V-1.1. Introduction,"; *Status Small React. Des. Without on-Site Refuelling*, 2007, 235.
- [21] Karimi, J.; Shayesteh, M.; Zangian, M. "Investigation of Uo2 Fuel Efficiency for ABV Small Modular Reactor"; *Energy Sources, Part a Recover. Util. Environ. Eff.*, 2021, 1-19. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1967516>.
- [22] Khan, S. U.; Danish, S. N.; Haider, S.; Khan, S. U. "Theoretical Calculation Simulation Studies of ABV Nuclear Reactor Coupled with Desalination System"; *Int. J. Energy Res.* 2015, 39, 1554-1563. <https://doi.org/10.1002/er.3363>.
- [23] Karimi, J.; Shayesteh, M.; Zangian, M. "Core Calculations for Small Modular Reactor During Burnup Cycle"; *Energy*
- [1] Tan, K. W. "Commercialization Potential of Dye-Sensitized Mesoscopic Solar Cells"; *Massachusetts Institute of Technology*, 2008.
- [2] Chu, S.; Majumdar, A. "Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future"; *Nature* 2012 488, 294-303.
- [3] Nason, P.; Webber, B. "Next-to-Leading-Order Event Generators"; *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2012, 62, 187-213.
- [4] Shafiee, S.; Topal, E. "An Econometrics View of World wide Fossil Fuel Consumption and the Role of Us"; *Energy Policy* 2008, 36 , 775-786.
- [5] Bodansky, D. "Nuclear Energy: Principles, Practices, and Prospects"; *Springer Science & Business Media* 2007.
- [6] Kuznetsov, V. "Options for Small and Medium Sized Reactors (SMRs) to Overcome Loss of Economies of Scale and Incorporate Increased Proliferation Resistance and Energy Security"; *Prog. Nucl. Energy* 2008, 50, 242-250. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.006>
- [7] Budnitz, R. J. H.; Rogner, H.; Shihab-Eldin, A. "Expansion of Nuclear Power Technology to New Countries-Smrs, Safety Culture Issues, and the Need for an Improved International Safety Regime"; *Energy Policy* 2018, 119, 535-544. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.051>

- Sources, Part a Recover. Util. Environ. Eff. 2021, 1–18. <https://doi.org/10.22034/rpe.2021.286704.1030>
- [24] Karimi, J.; Shayesteh, M.; Zangian, M. “Neutronic Analysis of Different Patterns of ABV Reactor Core Using Low Enrichment UO<sub>2</sub> Fuel”; Radiat. Phys. Eng 2021, 2, 37–42. <https://doi.org/10.22034/rpe.2021.286704.1030>
- [25] Su, L.; Yuan, Z.; Fung, J. C. H.; Lau, A. K. H. “A Comparison of HYSPLIT Backward Trajectories Generated From Two GDAS Datasets”; Sci. Total Environ. 2015, 506, 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.072>
- [26] McGuire, S. A.; Ramsdell, J. V.; Athey, G. F. “RASCAL 3.0. 5: Description of Models and Methods. Office of Nuclear Security and Incident Response, US Nuclear Regulatory”; 2007.
- [27] Ramsdell, J. V.; Athey, G. F.; Rishel, J. P. “RASCAL 4: Description of Models and Methods. United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Security and ...”; 2012. <https://doi.org/10.1504/PIE.2018.095869>.
- [28] Faisal, S. I.; Islam, M. S.; Soner, M. A. M. “Prediction of Radioactivity Releases for a Long-Term Station Blackout Event in the Vver-1200 Nuclear Reactor of Bangladesh”; Nucl. Eng. Technol. 2023, 55, 696–706. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.10.003>.
- [29] Jabbari, M.; Hadad, K.; Pirouzmand, A. “Re-assessment of Station Blackout Accident in VVER-1000 NPP With Additional Measures Following Fukushima Accident Using Relap/Mod3.2”; Ann. Nucl. Energy 2019, 129, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.006>.
- [30] Draxler, R. R.; Stunder, B.; Rolph, G.; Stein, A.; Taylor, A. “HYSPLIT tutorial”; NOAA Air Resour. Lab. Silver Spring, MD, USA, 2012.
- [31] Ramsdell Jr, J. V. “Rascal 4.3. Dispersion and Deposition Models”; Proc. 18<sup>th</sup> Annu. George Mason Univ. Conf. Atmospheric Transport and Dispersion Modelling 2014.
- [32] Nuclear Regulatory Commission (U.S.) (NRC), “Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Power Plants”; 2015, 2, Available: