Archive of SID

فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۳، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶، صفحهٔ ۶۳۵- ۶۵۰

شبیه‌سازی انتقال، پخش جوی و نهشت آلاینده‌های هسته‌ای رها شده از یک حادثهٔ فرضی در نیروگاه بوشهر

فرشته کاویانی[۱]، محمدحسین معماریان[۲]* و محمد اسلامی کلانتری[۲]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. استادیار، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۹۵/۳/۳۱، پذیرش نهایی: ۹۵/۱۱/۵)

چکیده

حوادث هسته‌ای چرنوبیل و فوکوشیما نشان دادند که حادثهٔ هسته‌ای مسئله‌ای در مقیاس منطقه‌ای نیست و هسته‌های پرتوزا تحت شرایط جوی، صدها و هزاران کیلومتر پخش و انتقال می‌یابند و تأثیر درازمدت نامطلوب و خطرناک روی محیط‌زیست و سلامتی انسان‌ها می‌گذارند. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مقاله به شبیه‌سازی انتقال، پخش جوی و نهشت آلاینده‌های هسته‌ای رهاشده از حادثهٔ فرضی نیروگاه بوشهر با استفاده از مدل HYSPLIT پرداخته شده است. حادثهٔ فرضی نیروگاه بوشهر براساس بزرگ‌ترین حادثهٔ هسته‌ای جهان، حادثهٔ چرنوبیل، طراحی شده است. در این پژوهش، فرض شده که حادثهٔ نیروگاه هسته‌ای بوشهر در اول دی ماه ۱۳۹۳ اتفاق افتاده و مهم‌ترین هسته‌های پرتوزا یعنی سزیم-۱۳۷، ید-۱۳۱، استرانسیم-۹۰، پلوتونیم-۲۳۹ و تلوریم-۱۳۲ در این شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در بازهٔ زمانی یک ماه نشان می‌دهد که مواد هسته‌ای رها شده از این حادثه شهرستان‌های تنگستان، دشتی، دیر، کنگان، جم و عسلویه را بیشتر از مناطق دیگر آلوده می‌کنند و بیشینهٔ نهشت آلاینده‌های هسته‌ای در بخش ساحلی شهرستان تنگستان است. آلودگی هسته‌ای ناشی از این حادثه تأثیر زیادی روی مناطق جنوبی، جنوب شرقی، شرقی و بخشی از مناطق شمال شرقی ایران می‌گذارد و در این مدت نه تنها ایران بلکه اکثر کشورهای آسیایی، بخشی از قارهٔ آفریقا، آمریکا، اروپا و حتی استرالیا را نیز به مقادیر کمتر، تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ایران بیشینهٔ غلظت آلاینده‌های هسته‌ای در شهرهای لامرد و بندرعباس است. در اولین روز حادثه، بیشینهٔ غلظت مواد پرتوزای ورودی به لامرد در ارتفاع ۱۰ متری $۱٫۴۵\times۱۰^{۴}\ \frac{Bq}{m^{۳}}$ و بیشینهٔ نهشت آن‌ها در این شهر $۹٫۵۸\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ است. همچنین در این مقاله، حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر در اول دی ماه ۱۳۹۳ با حوادث فرضی راکتور بوشهر در اول فروردین، اول تیر و اول مهر ۱۳۹۴ مقایسه شده است. به‌دلیل تأثیر تقریباً یکسان سامانه‌های فشاری بر نیروگاه بوشهر، پخش و انتقال مواد هسته‌ای رها شده از حادثهٔ اول تیر و حادثهٔ اول مهر در جهت جنوب شرقی نیروگاه بوده که با حادثهٔ اول دی تقریباً مشابه است. با گذشت زمان، پخش و انتقال هسته‌های پرتوزا متفاوت می‌شود اما در هر سه حادثه بیشترین آلودگی برای مناطق جنوبی ایران است. از نتایج این پژوهش، تحت شرایط جوی مشابه می‌توان در فوریت‌های هسته‌ای نیروگاه بوشهر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های هسته‌ای، پخش جوی، شبیه‌سازی، نیروگاه بوشهر، HYSPLIT.

۱. مقدمه

راکتورها و نیروگاه‌های هسته‌ای طبق استانداردهای بالایی طراحی و ساخته می‌شوند، اما وقوع بلایای طبیعی سهمگین و خطرات احتمالی جنگ‌ها می‌تواند آسیب جدی به آن‌ها وارد کند و موجب انتشار آلاینده‌های هسته‌ای در محیط شود. یک اختلال کوچک در سیستم‌های کنترلی راکتور نیز می‌تواند باعث گرم‌شدن بیش از حد و ذوب میله‌های سوخت شود و در نتیجه، مقدار قابل‌توجهی مواد پرتوزا به محیط‌زیست وارد کند. رهایی مواد هسته‌ای به جو، تهدید بزرگی برای سلامتی بشر و محیط‌زیست خواهد بود.

حادثهٔ چرنوبیل در اکراین در سال ۱۹۸۶ و حادثهٔ فوکوشیما در ژاپن در سال ۲۰۱۱ نمونه‌هایی از حوادث هسته‌ای هستند که به‌طور کامل درک بشر از خطرِ تشعشع هسته‌ای را تغییر داده‌اند. بعد از حادثهٔ چرنوبیل، محققان علاقه‌مند در زمینهٔ پراکندگی جوی به پژوهش روی شبیه‌سازی عددی مقیاس محلی و قاره‌ای انتقال مواد هسته‌ای با استفاده از مدل‌های ترکیبی مختلف پرداختند. یکی از اولین شبیه‌سازی‌ها در مقیاس منطقه‌ای توسط اَپ-

*نگارنده رابط: memarian@yazd.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

سیمون و ویلسون (۱۹۸۶) انجام گرفته است. اسوانبرگ و هوفرت (۲۰۰۱) نیز با استفاده از اندازه‌گیری‌های سزیم-۱۳۷ جوی و مدل HYSPLIT تأیید کردند که چرنوبیل یک منبع سزیم-۱۳۷ در اروپا است.

در سال ۲۰۰۸، تایفون کینداپ و همکاران با استفاده از دو روش متفاوت، یکی تحلیل خط سیر و دیگری مدل ردیاب MM5، پخش و انتقال آلاینده‌های پرتوزای رهاشده به جو از حادثهٔ فرضی نیروگاه هسته‌ای متسامور در ارمنستان را بر روی ترکیه بررسی کردند.

بعد از حادثهٔ فوکوشیما، تاکمورا و همکاران (۲۰۱۱) به شبیه‌سازی انتقال دوربرد ذرات جوی ساطع‌شده از نیروگاه هسته‌ای فوکوشیما دایچی به ایالات متحده و اروپا با استفاده از مدل SPRINTARS پرداختند. هرناندز-سبالوز و همکاران (۲۰۱۲)، هانگ و همکاران (۲۰۱۲) و لیو و همکاران (۲۰۱۳) مسیر انتقال هسته‌های پرتوزای رها شده از حادثهٔ فوکوشیما را به‌ترتیب روی نیمکرهٔ شمالی، کرهٔ جنوبی و شیان چین با استفاده از مدل HYSPLIT بررسی کردند. فی و همکارانش (۲۰۱۴) با استفاده از مدل ترکیبی ایجاد شده به‌وسیلهٔ مدل کیفیت هوای Models-3/CMAQ و مدل جوی WRF مسیر انتقال و توزیع آلاینده‌های هسته‌ای نیروگاه فوکوشیما را در فاصله‌های خیلی طولانی و خیلی کوتاه شبیه‌سازی کردند.

قادر و همکاران (۱۳۹۱) به شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های خروجی از دودکش نیروگاه بوشهر با استفاده از مدل HYSPLIT پرداختند. در این شبیه‌سازی از داده‌های هواشناختی خروجی از مدل میان‌مقیاس WRF استفاده شده است.

تجربهٔ چرنوبیل و فوکوشیما نشان می‌دهند که یک حادثهٔ امکان‌پذیر در نیروگاه هسته‌ای بوشهر، به‌وسیلهٔ نهشت و غلظت زیاد آلاینده‌های هسته‌ای رهاشده به جو می‌تواند روی مناطق زیادی اثر گذارد. بنابراین هدف از این پژوهش شبیه‌سازی انتقال، پخش و نهشت مواد هسته‌ای رهاشده به جو در حادثهٔ فرضی نیروگاه بوشهر است.

۲. مدل پخش جوی HYSPLIT

توسعهٔ مدل‌های پیچیدهٔ انتقال جوی برای پیش‌بینی انتقال دوربرد و نهشت مواد هسته‌ای لازم است. یکی از مدل‌های پخش جوی که مدل ابتدایی آن توسط سازمان ملی جوی و اقیانوسی (NOAA) استفاده می‌شد و در اواخر سال ۱۹۷۰ توسط آزمایشگاه منابع هوایی (ARL) توسعه یافت، مدل HYSPLIT (دراکسلر، ۱۹۹۹؛ دراکسلر و حس، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸) بود. امروزه از این مدل برای پیش‌بینی پخش جوی دود ناشی از آتش‌سوزی‌های مخرب (رلف و همکاران، ۲۰۰۹؛ استین و همکاران، ۲۰۰۹)، گرد و خاک موجود در باد (دراکسلر و همکاران، ۲۰۱۰)، خاکستر آتشفشانی (استاندر و همکاران، ۲۰۰۷) و پخش جوی مواد حاصل از حوادث هسته‌ای و شیمیایی (دراکسلر و رلف، ۲۰۱۲) استفاده می‌شود.

۲-۱. تشریح مدل HYSPLIT

مدل HYSPLIT، نسخهٔ ۴، به‌طور مشترک به‌وسیلهٔ سازمان ملی جوی و اقیانوسی، آزمایشگاه منابع هوایی و سازمان هواشناسی استرالیا توسعه یافت. HYSPLIT یک ابزار محاسباتی است که برای ایجاد خط سیر بسته هوا و انجام شبیه‌سازی‌های انتقال، پخش و نهشت آلاینده‌های هوا در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی شامل محلی، منطقه‌ای و دوربرد طراحی شده است (دراکسلر و رلف، ۲۰۱۰).

روش محاسبهٔ مدل HYSPLIT، ترکیبی از روش لاگرانژی و اویلری است (دراکسلر، ۲۰۰۴). این دو روش، برای شبیه‌سازی پخش آلاینده‌های هوا، به‌طور گسترده به‌کار گرفته شده‌اند. روش اویلری زمانی اعمال می‌شد که فرایند انتشار پیچیده باشد (دراکسلر و حس، ۱۹۹۸). در این روش، غلظت هوا برای هر سلول شبکه به‌وسیلهٔ انتگرال‌گرفتن روی شارهای آلاینده‌ای که به‌دلیل پخش یا فرارفت وارد هر سلول شبکه می‌شوند، محاسبه می‌گردد (دراکسلر، ۲۰۰۴). روش لاگرانژی معمولاً زمانی استفاده می‌شود که انتشار از یک منبع نقطه‌ای صورت

www.SID.ir

Archive of SID

می‌گیرد (دراکسلر و حس، ۱۹۹۸). در این روش، غلظت هوا به‌وسیلهٔ جمع سهم هر پف آلاینده که به‌صورت افقی از میان سلول شبکه حرکت می‌کند، محاسبه می‌شود (دراکسلر، ۲۰۰۴).

داده‌های هواشناختی مورد نیاز مدل HYSPLIT حداقل باید شامل مؤلفه‌های افقی باد، دما، ارتفاع یا فشار و فشار سطح باشد (دراکسلر و حس، ۱۹۹۷). در این مدل علاوه بر داده‌های هواشناختی، مشخصات هندسی، آهنگ خروج آلاینده‌ها از چشمه‌های آلودگی، سرعت نهشت و نیمه‌عمر آلاینده‌های هسته‌ای به‌عنوان ورودی مورد نیاز است.

۲-۲. اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل HYSPLIT توسط گان‌هیو جانگ و همکاران (۲۰۰۷) انجام گرفته است. آن‌ها پخش جوی سزیم-۱۳۷ از حادثهٔ چرنوبیل را با استفاده از این مدل تحلیل کردند. با اینکه مدل HYSPLIT مدل پخش دوربرد است و شرایط منبع انتشار آلاینده‌ها به‌طور دقیق معلوم نیست و مقدار زیادی خطا دارد اما آن‌ها مشاهده کردند که دادهٔ برآورد شده نسبتاً مشابه دادهٔ اندازه‌گیری شده است. این نشان می‌دهد که استفاده از مدل HYSPLIT در فوریت‌های هسته‌ای مناسب می‌باشد.

۳. روش تحقیق

فرض می‌شود که حادثهٔ بزرگی در نیروگاه هسته‌ای بوشهر منجر به رهاشدن مقادیر زیادی هسته‌های پرتوزا به محیط شود. مثل حادثهٔ چرنوبیل که در طول حادثه مقدار ۸۰۰۰ کیلوگرم ذرات پرتوزا به محیط رها شدند (سندالز و همکاران، ۱۹۹۳). این حادثهٔ بزرگ در نیروگاه بوشهر می‌تواند ناشی از حادثهٔ قطع خنک‌کننده باشد. اگر حادثهٔ قطع خنک‌کننده رخ دهد و همزمان نقص فنی در دستگاه‌های اضطراری قلب باعث شود که این دستگاه‌ها نتوانند قلب را خنک کنند، حادثه به ذوب‌شدن قلب راکتور می‌انجامد. در هر حادثه‌ای که ممکن است اتفاق افتد و باعث ذوب قلب راکتور شود، در صورت عملکرد نامناسب دستگاه‌های اضطراری، مواد پرتوزای زیادی به محیط‌زیست منتشر شده و سلامتی مردم را به خطر می‌اندازد. شرایط منبع رهاسازی این حادثه تقریباً مشابه حادثهٔ چرنوبیل طراحی شده است.

۳-۱. شرایط منبع رهاسازی

به‌دلیل اهمیت بیشتر سزیم-۱۳۷، ید-۱۳۱، استرانسیم-۹۰، پلوتونیم-۲۳۹ و تلوریم-۱۳۲ از این هسته‌های پرتوزا در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. موجودی این محصولات شکافت در قلب راکتور بوشهر در زمان حادثه و درصدی از آن‌ها که به محیط رها شده‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده است. درصد رهاسازی مواد هسته‌ای به محیط، براساس حادثهٔ چرنوبیل است.

فرض می‌شود که انتشار مواد پرتوزا به محیط در طول سه روز صورت گیرد و بعد از سه روز، این حادثه مهار شده و رهاسازی آن‌ها به محیط متوقف شود. آهنگ انتشار هسته‌های پرتوزا در این سه روز متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که در روز اول ۶۰ درصد، روز دوم ۳۰ درصد و روز سوم ۱۰ درصد آن‌ها به محیط منتشر می‌شوند. هسته‌های پرتوزای رهاشده در طول این سه روز با توجه به سرعت و انرژی خروج آن‌ها از راکتور در ارتفاعات متفاوتی متوقف می‌شوند. فرض شده که ارتفاع رهاسازی مواد پرتوزای رها شده از حادثهٔ راکتور بوشهر، ۲۲۵، ۴۲۵، ۷۱۵، ۱۰۹۰، ۱۵۷۵ و ۲۲۲۵ متر باشد. این ارتفاعات، ارتفاعات رهاسازی تقریبی در حادثهٔ چرنوبیل هستند (برنت و همکاران، ۲۰۰۲). براساس حادثهٔ چرنوبیل مقدار مواد پرتوزایی که در هر ارتفاع متوقف می‌شوند نیز متفاوت است. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به ارتفاع رهاسازی در مدت حادثه و درصدی از هسته‌های پرتوزای رها شده به محیط در هر ارتفاع رهاسازی نشان داده شده است.

۳-۲. شرایط هواشناختی در روز حادثه

سامانه‌های جوی برای هر روز متفاوت هستند؛ به همین منظور برای بررسی پخش آلاینده‌های جوی لازم است

www.SID.ir

Archive of SID

شرایط همدیدی آن روز مد نظر قرار گیرد. در این مقاله، برای نمونه روز اول دی ماه ۱۳۹۳ در نظرگرفته شده است تا نشان داده شود که با توجه به سامانه‌های فشاری و با استفاده از این مدل می‌توان پخش جوی آلاینده‌های هسته‌ای رهاشده از حادثهٔ راکتور بوشهر را پیش‌بینی کرد. برای پیش‌بینی پخش جوی آلاینده‌های رها شده در حادثهٔ راکتور، بحث فصول و میانگین شرایط هواشناختی ماه‌های هر فصل مطرح نیست، بلکه روز و حتی لحظهٔ وقوع حادثه و سامانه‌های فشاری حاکم بر منطقه مهم هستند. سامانه‌های فشاری که بر روند پخش آلاینده‌ها اثر می‌گذارند، ممکن است در هر روز و هر لحظه متفاوت باشند. بنابراین حادثهٔ اول دی ماه ۱۳۹۳ به‌عنوان حادثهٔ فصل زمستان در نظر گرفته نشده است.

داده‌های هواشناختی به‌کاررفته در این شبیه‌سازی، داده‌های GDAS با تفکیک مکانی یک درجه است. این داده‌ها در سطوح بالا شامل ۲۰ سطح فشاری از ۱۰۰۰ تا ۲۰ هکتوپاسکال هستند. برای هر سطح فشاری پارامترهایی مانند ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، رطوبت‌نسبی، تندی و جهت باد مشخص شده است. داده‌های GDAS در سطح زمین شامل پارامترهای زیادی از جمله فشار، دما، باران‌تجمعی، تندی و جهت باد است. پارامترهای هواشناختی برای هر ارتفاع رهاسازی حادثهٔ فرضی اول دی ماه ۱۳۹۳ در جدول ۳ آمده است.

جدول۱. مواد پرتوزای رهاشده به محیط در حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر.

آلاینده‌ها	نیمه‌عمر (روز)	موجودی قلب راکتور در زمان حادثه (بکرل) (آنور، ۲۰۰۳)	رهاسازی آلاینده‌ها (%) (آنور، ۲۰۰۳)	مقدار آلایندهٔ رهاشده به محیط (بکرل)
سزیم-۱۳۷	۱۰۹۷۵٫۵۵	$۱٫۷۵\times۱۰^{۱۷}$	۳۰	$۰٫۵۲۵\times۱۰^{۱۷}$
ید-۱۳۱	۸٫۰۲	$۳٫۰۵\times۱۰^{۱۸}$	۵۵	$۱٫۶۷۷۵\times۱۰^{۱۸}$
استرانسیم-۹۰	۱۰۵۰۸٫۳۵	$۱٫۳۷\times۱۰^{۱۷}$	۵	$۰٫۰۶۸۵\times۱۰^{۱۷}$
پلوتونیم-۲۳۹	۸۸۰۰۱۵۰	$۸٫۲۳\times۱۰^{۱۴}$	۳٫۵	$۰٫۲۸۸۰\times۱۰^{۱۴}$
تلوریم-۱۳۲	۳٫۲۰	$۴٫۲۶\times۱۰^{۱۸}$	۴۰	$۱٫۷۰۴\times۱۰^{۱۸}$

جدول۲. اطلاعات مربوط به مواد پرتوزای رها شده به محیط در ارتفاع رهاسازی مختلف در حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر.

روز	ارتفاع رهاسازی (متر)	آلاینده‌های رهاشده از راکتور، در هر ارتفاع رهاسازی (%)
اول	۷۱۵	۵۰
	۱۰۹۰	۳۵
	۱۵۷۵	۱۵
	۲۲۲۵	۵
دوم	۲۲۵	۱۰
	۴۲۵	۴۰
	۷۱۵	۳۰
	۱۰۹۰	۲۰
سوم	۲۲۵	۵۰
	۴۲۵	۵۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳. اطلاعات مربوط به پارامترهای هواشناختی در ارتفاع رهاسازی مختلف.

تاریخ شروع رهاسازی	ارتفاع رهاسازی	پارامترهای هواشناختی			
		دما (^oC)	تندی باد ($\frac{m}{s}$)	جهت باد (deg)	رطوبت‌نسبی (%)
اول دی ۱۳۹۳ (۲۲ دسامبر ۲۰۱۴)	۲۲۲۵	۴٫۷	۱۱٫۹	۲۷۸٫۳	۷۱٫۲
	۱۵۷۵	۹٫۱	۷٫۶	۲۹۶٫۱	۶۲٫۶
	۱۰۹۰	۱۲٫۲	۵٫۸	۳۰۲٫۷	۶۸٫۷
	۷۱۵	۱۴٫۲	۴٫۶	۳۰۹٫۱	۷۶٫۹
دوم دی ۱۳۹۳ (۲۳ دسامبر ۲۰۱۴)	۴۲۵	۱۳٫۸	۳٫۴	۳۳۲٫۹	۶۴٫۳
	۲۲۵	۱۵٫۴	۳٫۲	۳۳۸٫۸	۶۱٫۸

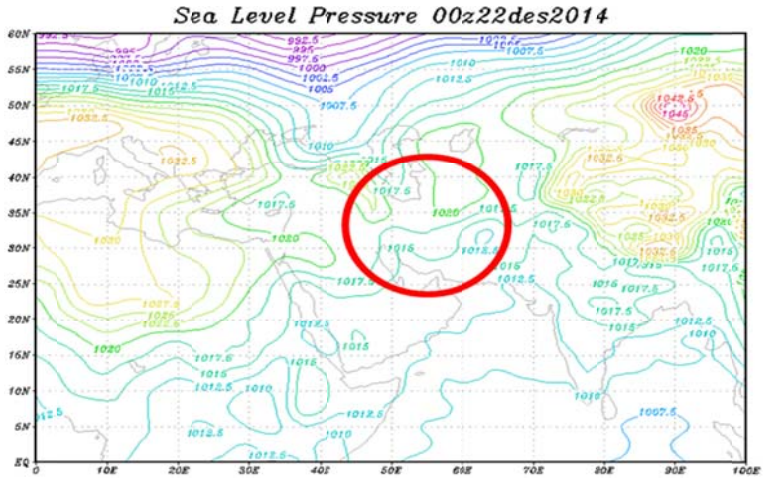
۳-۳. شبیه‌سازی پخش جوی هسته‌های پرتوزا

شبیه‌سازی انتقال، پخش جوی و نهشت مواد پرتوزای رها شده در این حادثه برای ۱، ۱۰، ۲۴، ۴۸، ۱۶۸، ۳۳۶ و ۷۲۰ ساعت در ترازهای مختلف انجام گرفته و پخش جوی مواد پرتوزا روی استان بوشهر، ایران و جهان به‌طور مجزا بررسی شده است. همچنین نمودار نهشت و غلظت برحسب زمان برای چند منطقه در استان بوشهر و نمودارهای غلظت برحسب زمان و ارتفاع برای بعضی از شهرهای ایران رسم شده است. علاوه بر این، حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر در اول دی ماه ۱۳۹۳ با حوادث فرضی راکتور بوشهر در اول فروردین، تیر و مهر ماه ۱۳۹۴ مقایسه شده است.

تفکیک مکانی مورد استفاده در مدل برابر ۰/۰۵ درجه و تفکیک زمانی نیز یک دقیقه است. شبکهٔ مورد استفاده در مدل برای استان بوشهر ۲۰ درجه، برای ایران ۳۰ درجه و برای کرهٔ زمین ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده و مرکز شبکه نیز نیروگاه بوشهر است.

۴. نتایج و بحث

فرض شده که حادثهٔ راکتور بوشهر در روز اول دی ماه ۱۳۹۳ اتفاق افتاده است. شکل ۱ سامانه‌های فشاری را نشان می‌دهد که در زمان وقوع حادثه، ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این سامانه‌ها شامل زبانه‌های یک سامانهٔ پرفشار از سمت غرب، سامانه‌های پرفشار در شمال غرب و شمال شرق و یک سامانهٔ کم‌فشار از سمت شرق است.



شکل۱. نقشهٔ فشار سطح زمین در زمان وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳ (۲۲ دسامبر ۲۰۱۴)؛ دایرهٔ قرمزرنگ محدودهٔ ایران را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۱. پخش جوی هسته‌های پرتوزا روی استان بوشهر

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که یک ساعت پس از وقوع حادثه، مواد پرتوزای رها شده به محیط در جهت شرق و جنوب شرقی نیروگاه و در ارتفاعات ۲۵۰ تا ۲۹۰۰ متری تا شعاع ۵۵ کیلومتری از محل حادثه انتقال می‌یابند. سه ساعت بعد از حادثه، بخشی از آلاینده‌های هسته‌ای در شهرستان تنگستان و دشتی نهشت کرده و روستاهایی مانند بندر رستمی، بندر بوالخیر، بندر عامری، هدکان، زیزار، فقیه حسنان و فقیه احمدان را آلوده می‌کنند. دو ساعت بعد، مواد پرتوزا در شهر کاکی و روستاهای کبگان، باغ‌شلی و گنخک شیخی شهرستان دشتی و همچنین در روستاهای شهرستان دیر مانند ابکش، شهنیا و کناری پخش می‌شوند. ۱۰ ساعت بعد از وقوع حادثه، آلاینده‌های هسته‌ای در روستاهای بندرگاه و هلیله که نزدیک‌ترین روستاها به نیروگاه هستند، نهشت می‌کنند. در این مدت، تمام روستاهای ساحلی تنگستان، شهرهای بادوله و شنبه و روستاهایی مانند چاوشی، مل‌گل، سنا، حناشور و باغان در شهرستان دشتی، بندر دیر و شهرهای آبدان، دوراهک و بردستان و روستاهای شیبرم و ملسوخته در شهرستان دیر، بندر کنگان، بندر سیراف، شهر بنک و روستاهای پرک و شیرینو در شهرستان کنگان، شهرهای جم و انارستان و روستاهایی مانند حسین‌آباد، تشان و سرچشمه در شهرستان جم و روستاهایی مانند خیارو و بستانو در شهرستان عسلویه نیز آلوده می‌شوند. ۲۴ ساعت بعد از وقوع حادثه، آلودگی هسته‌ای در شهرستان عسلویه پیشروی کرده و بندر عسلویه، نخل‌تقی و روستاهای بیدخون، دهنو، بزباز، اخند، بساتین و هاله را آلوده می‌کند.

بعد از گذشت ۴۸ ساعت از وقوع حادثهٔ نیروگاه بوشهر، شهر دلوار و روستاهایی مانند جائینک و عالی‌حسینی در تنگستان، شهر خورموج و روستاهای کلل و محمدآباد در شهرستان دشتی تحت تأثیر مواد هسته‌ای قرار می‌گیرند. بعد از این مدت، آلاینده‌های هسته‌ای از استان بوشهر خارج شده و پخش و نهشتی در استان صورت نمی‌گیرد.

یک ماه بعد از وقوع حادثه، مواد هسته‌ای تحت تأثیر سامانه‌های فشاری به استان وارد شده و در بندر بوشهر و شهرک عالیشهر در شهرستان بوشهر، بندر گناوه و بندر ریگ در شهرستان گناوه، شهر اهرم در تنگستان و شهرهای بوشکان، دالکی، وحدتیه، شبانکاره، برازجان، سعدآباد و آبپخش در دشتستان نهشت می‌کنند. بخشی از نتایج شبیه‌سازی پخش و نهشت آلاینده‌های هسته‌ای رهاشده از این حادثه روی استان بوشهر در شکل ۲ نشان داده شده است.

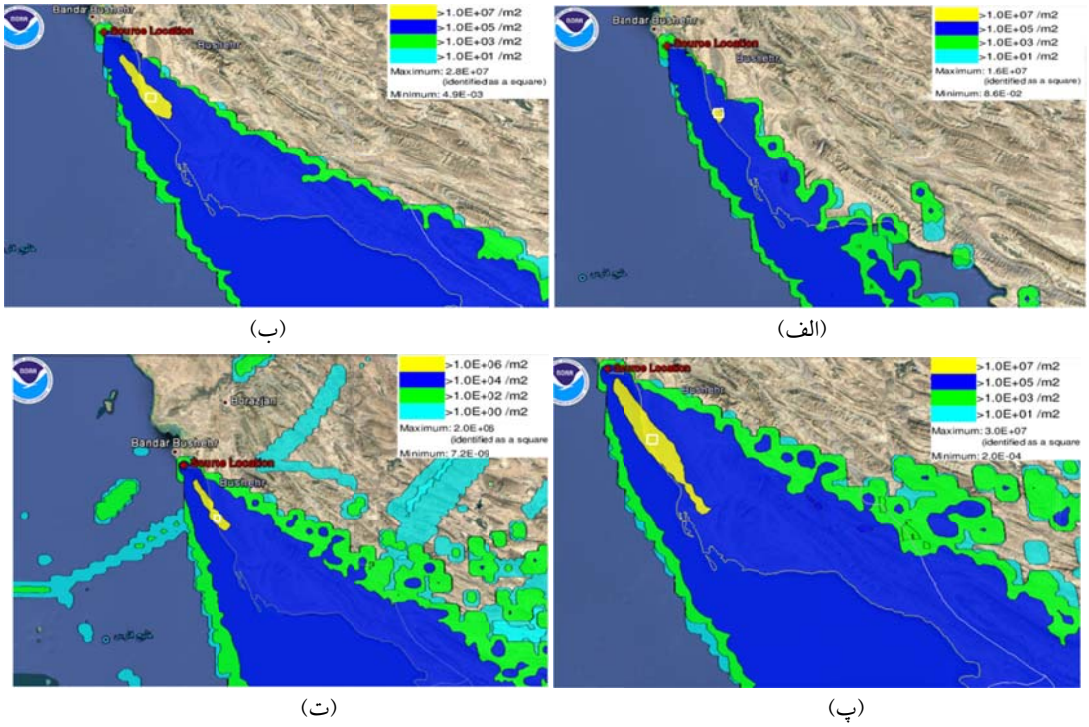
نمودار غلظت و نهشت مواد پرتوزای رهاشده از حادثهٔ راکتور بوشهر برحسب زمان برای چند منطقهٔ نزدیک و دور از نیروگاه رسم شده است. منطقه‌های در نظر گرفته شده عبارت‌اند از روستای ساحلی کلات در تنگستان، شهرهای آبدان، جم و بندر عسلویه که در بین این مناطق، روستای کلات نزدیک‌ترین و بندر عسلویه دورترین مکان از نیروگاه است. همان‌طور که نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهند، نهشت هسته‌های پرتوزا در روستای کلات در اولین روز وقوع حادثه صورت می‌گیرد. در این روستا، بیشینهٔ نهشت آلاینده‌ها در ساعت ۹ صبح است و مقدار آن $۱٫۵۱\times۱۰^{۶}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ می‌باشد. مقدار نهشت آلاینده‌ها در روستای کلات دارای یک روند افزایش-کاهشی است و در بعضی زمان‌ها هیچ نهشتی صورت نمی‌گیرد تا اینکه در اواخر روز دوم، مقدار $۱٫۲۹\times۱۰^{۶}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ مواد پرتوزا در این روستا نهشت می‌کند. غلظت آلاینده‌های هسته‌ای در ارتفاع ۱۰ متری روستای کلات نیز دارای روند افزایش-کاهشی است و بیشینهٔ غلظت آن‌ها ۶ ساعت بعد از وقوع حادثه، $۱٫۹۰\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ است.

آلاینده‌های هسته‌ای در روز اول نیز به شهرهای آبدان، جم و بندر عسلویه وارد شده و مقدار نهشت آلاینده‌ها در این شهرها دارای روند افزایش-کاهشی است و در بعضی زمان‌ها نیز هیچ نهشتی صورت نمی‌گیرد. بیشینهٔ نهشت آلاینده‌ها در بعدازظهر اولین روز حادثه در شهر آبدان، در عصر روز دوم در شهر جم و در ساعت ۹ شب اولین روز

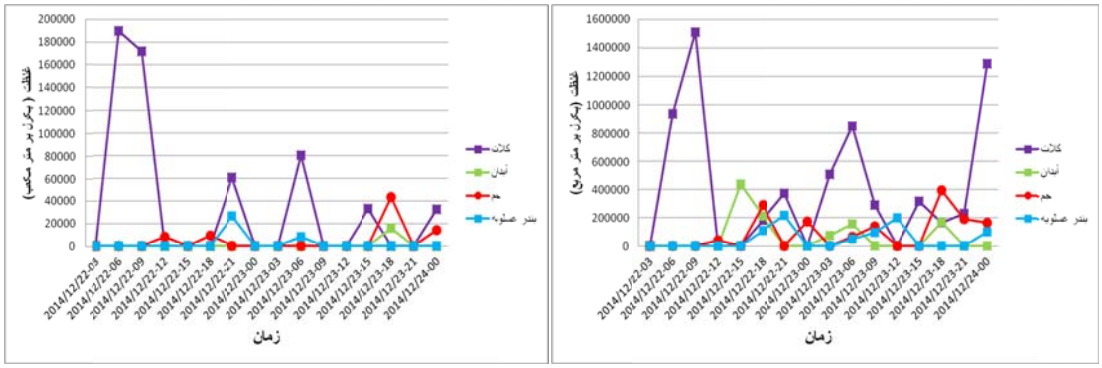
www.SID.ir

Archive of SID

حادثه در بندر عسلویه به‌ترتیب $۴٫۳۹\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$، $۳٫۹۳\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ و $۲٫۱۹\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ است. بیشینهٔ غلظت آلاینده‌ها در ارتفاع ۱۰ متری شهرهای آبدان، جم و بندر عسلویه نیز به‌ترتیب $۱٫۵۹\times۱۰^{۴}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ ، $۴٫۳۶\times۱۰^{۴}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ و $۲٫۶۴\times۱۰^{۴}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ می‌باشد. هر چند شهر آبدان از جم و بندر عسلویه به نیروگاه نزدیک‌تر است اما آلودگی هسته‌ای ارتفاع ۱۰ متری در جم و بندر عسلویه، بیشتر و به‌طورکلی نهشت آلاینده‌ها در جم بیشتر از آبدان است. در بین مناطق بررسی شده، بیشترین آلودگی به روستای ساحلی کلات واقع در تنگستان مربوط است.



شکل۲. شبیه‌سازی انتقال و نهشت مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاع ۷۱۵ متری الف: ۱۰، ب: ۲۴، پ: ۴۸ و ت: ۷۲۰ ساعت بعد از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳.



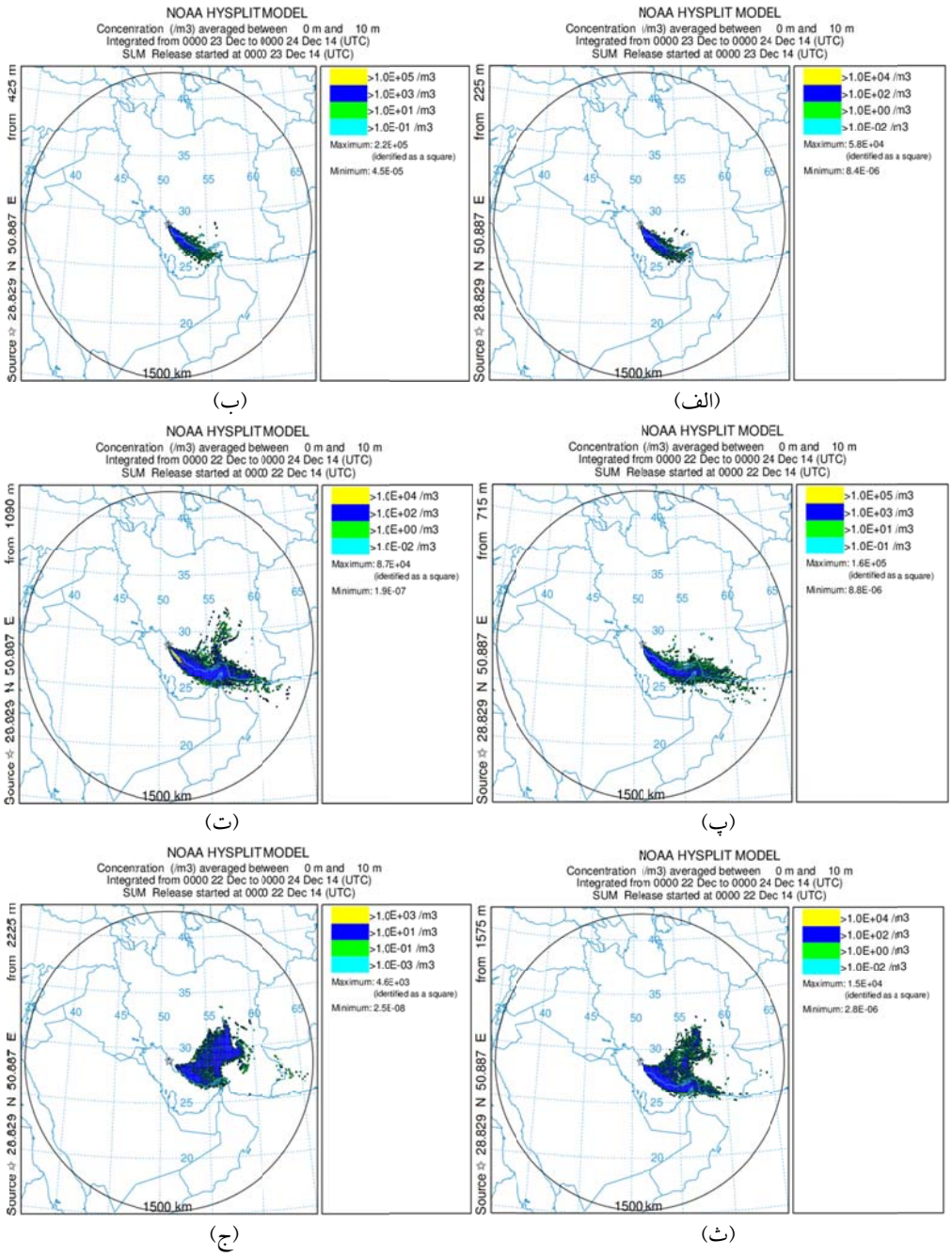
شکل۳. نمودارهای الف: نهشت و ب: غلظت مواد هسته‌ای در ارتفاع ۱۰ متری برحسب زمان، دو روز بعد از وقوع حادثه در استان بوشهر.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۲. پخش جوی هسته‌های پرتوزا روی ایران

بخشی از مواد هسته‌ای رها شده در حادثهٔ فرضی نیروگاه بوشهر که تحت تأثیر زبانه‌های یک سامانهٔ پرفشار از سمت غرب و یک سامانهٔ پرفشار روی شمال غرب ایران در جهت شرق نیروگاه حرکت کرده‌اند، بعد از گذشت ۱۰ ساعت به استان فارس وارد می‌شوند. ۲۴ ساعت بعد از وقوع حادثه، آلاینده‌های هسته‌ای در استان‌های فارس، هرمزگان، کرمان و سیستان و بلوچستان نهشت می‌کنند. شکل ۴ روند پخش و انتقال مواد پرتوزا را ۴۸ ساعت بعد از حادثه نشان می‌دهد.

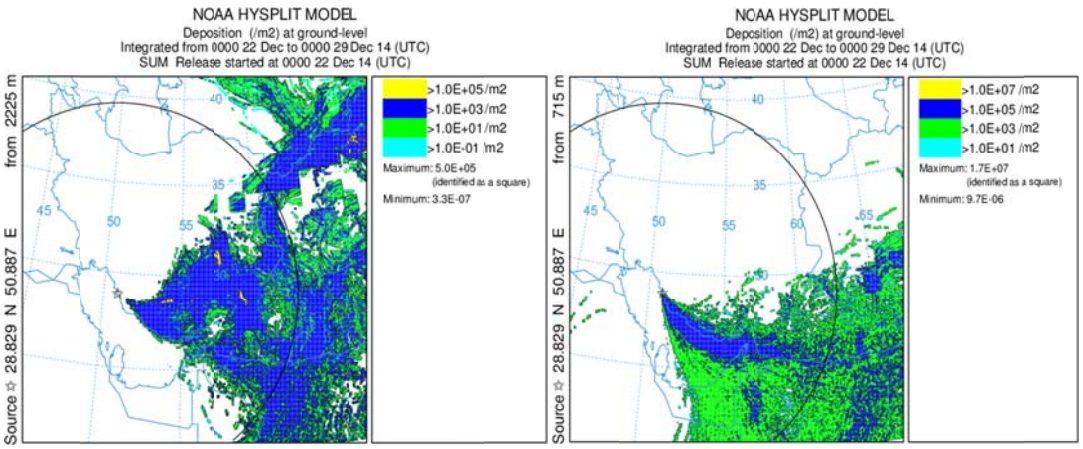


شکل ۴. شبیه‌سازی انتقال و پخش جوی مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاعات مختلف؛ الف: ۲۲۵، ب: ۴۲۵، پ: ۷۱۵، ت: ۱۰۹۰، ث: ۱۵۷۵ و ج: ۲۲۲۵ متر در تراز بین ۰ تا ۱۰ متری هنگامی‌که ۴۸ ساعت از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳ می‌گذرد.

www.SID.ir

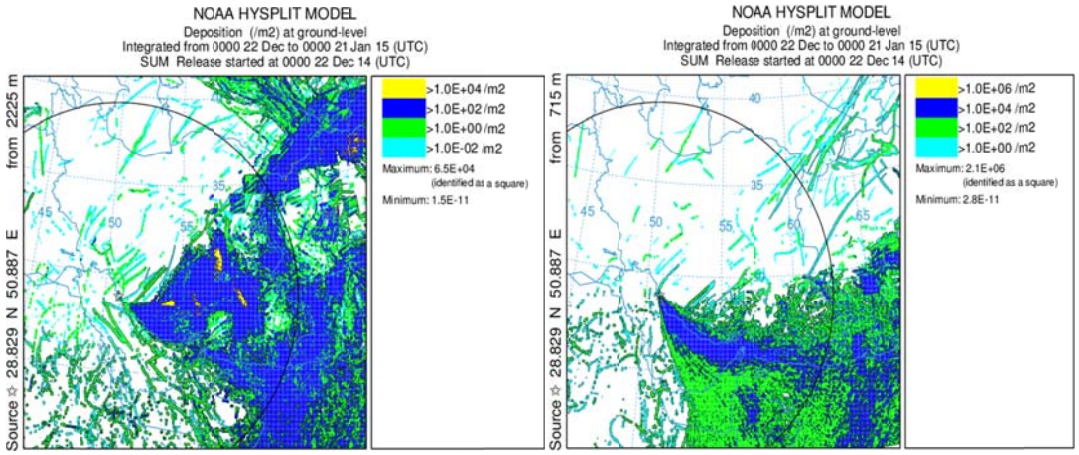
Archive of SID

۴۸ ساعت بعد از وقوع حادثه، مواد هسته‌ای تحت تأثیر زبانه‌های یک سامانهٔ پرفشار در غرب و شمال غرب و یک سامانهٔ کم‌فشار از سمت شمال شرق ایران قرار می‌گیرند و مقدار کمی از آلاینده‌های هسته‌ای به یزد، خراسان جنوبی و خراسان رضوی وارد می‌شوند، اما تراکم آلاینده‌ها در بخش‌های جنوب غربی، جنوبی و شرقی استان فارس، در کرمان و هرمزگان بسیار زیاد است. یک هفته بعد از حادثهٔ نیروگاه بوشهر، بخش‌های جنوبی، جنوب شرقی، شرقی و بخشی از مناطق شمال شرقی ایران به‌طور کامل آلوده شده و دریای خزر نیز تحت تأثیر آلاینده‌های هسته‌ای قرار گرفته است. یک ماه بعد از وقوع حادثه، آلاینده‌های هسته‌ای به‌طور خیلی پراکنده و با غلظت کمی در بخش‌های مرکزی، غربی، شمال غربی و شمالی ایران پخش شده است، اما همچنان بیشترین آلودگی در مناطق جنوبی، جنوب شرقی، شرقی و شمال‌شرقی است. بخشی از نتایج شبیه‌سازی پخش و نهشت آلاینده‌های هسته‌ای رهاشده از این حادثه روی ایران در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل۵. نهشت مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاع الف: ۷۱۵ و ب: ۲۲۲۵ متری یک هفته بعد از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳.



(ب) (الف)

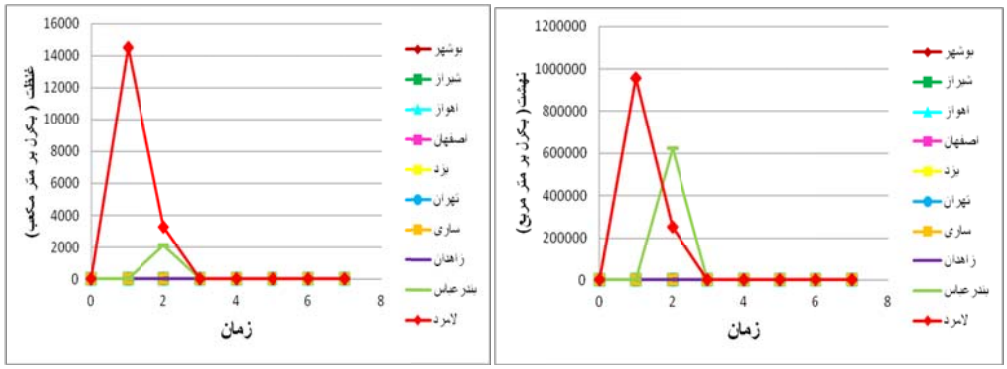
شکل۶. نهشت مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاع الف: ۷۱۵ و ب: ۲۲۲۵ متری یک ماه بعد از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳.

www.SID.ir

Archive of SID

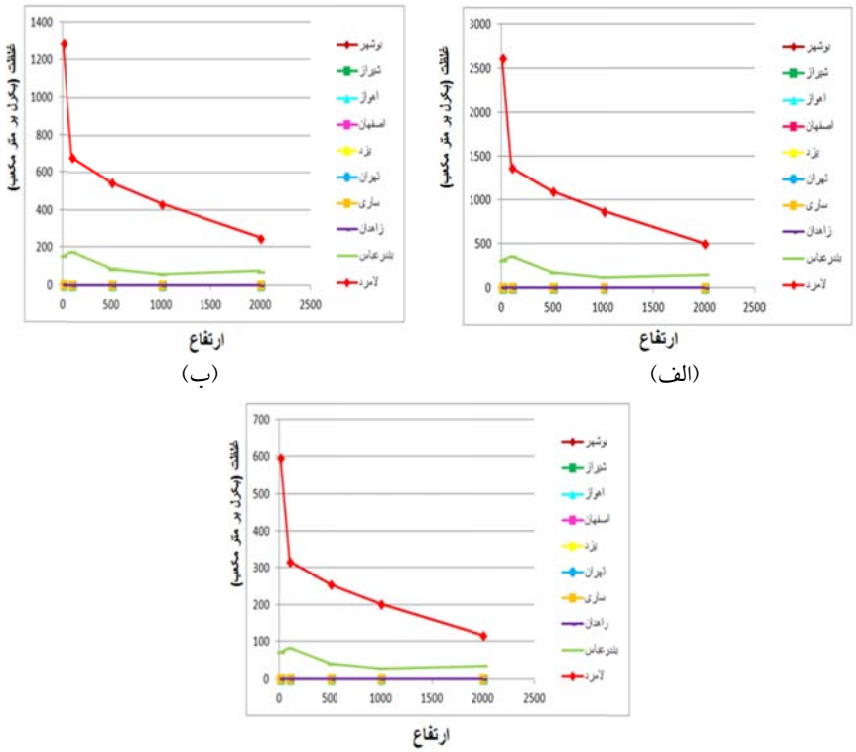
در شکل ۷، نمودارهای نهشت و غلظت برحسب زمان برای شهرهای مختلف ایران رسم شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که بیشترین آلودگی در لامرد و بندرعباس است. در این حادثه، بیشینهٔ نهشت و بیشینهٔ غلظت مواد پرتوزا در ارتفاع ۱۰ متری شهر لامرد به‌ترتیب $۹٫۵۸\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ و $۱٫۴۵\times۱۰^{۴}\ \frac{Bq}{m^{۳}}$ است.

نمودارهای شکل ۸ نیز روند کاهشی غلظت را در ارتفاعات لامرد نشان می‌دهند. در این شهر، در ارتفاع ۱۰ متری غلظت مواد پرتوزا از $۲٫۶۱\times۱۰^{۳}\ \frac{Bq}{m^{۳}}$ در یک هفته، به $۱٫۲۸\times۱۰^{۳}\ \frac{Bq}{m^{۳}}$ در دو هفته و $۵٫۹۷\times۱۰^{۲}\ \frac{Bq}{m^{۳}}$ در یک ماه می‌رسد. در بندرعباس نیز غلظت مواد پرتوزا تا ارتفاع ۱۰۰ متری افزایش یافته و در ارتفاعات بیشتر کاهش می‌یابد.



(ب) (الف)

شکل۷. نمودارهای الف: نهشت و ب: غلظت مواد هسته‌ای در ارتفاع ۱۰ متری برحسب زمان، یک هفته بعد از وقوع حادثه.



(ب) (الف)

(ج)

شکل۸. نمودارهای غلظت بر حسب ارتفاع الف) یک هفته ب) دو هفته و ج) یک ماه بعد از وقوع حادثه.

www.SID.ir

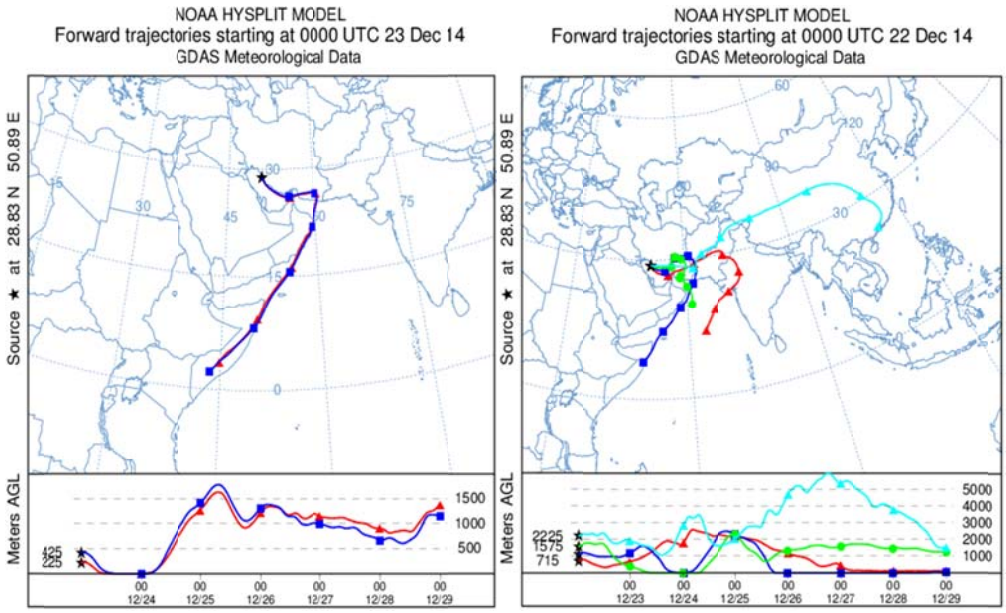
Archive of SID

۴-۳. پخش قاره‌ای هسته‌های پرتوزا

مسیر کلی انتقال مواد هسته‌ای رهاشده از حادثهٔ راکتور بوشهر یک هفته بعد از انتشار در شکل ۹ نشان داده شده است. مواد پرتوزای رها شده در روز اول و از ارتفاعات ۷۱۵، ۱۰۹۰، ۱۵۷۵ و ۲۲۲۵ متری، به‌ترتیب مسیر مشخص‌شده با رنگ قرمز، آبی، سبز و فیروزه‌ای در شکل ۹-الف را طی می‌کنند. موادی که در روز دوم از ارتفاعات ۲۲۵ و ۴۲۵ متری رها می‌شوند، به‌ترتیب مسیری را طی می‌کنند که در شکل ۹-ب با رنگ قرمز و آبی نشان داده شده است. شکل ۹ علاوه بر مسیر انتقال مواد پرتوزا در مدت زمان یک هفته، ارتفاع آن‌ها از سطح زمین را نیز نشان می‌دهد.

یک هفته بعد از حادثهٔ نیروگاه بوشهر، براساس شکل ۱۰، آلاینده‌های هسته‌ای پاکستان، افغانستان، ترکمنستان، ازبکستان، تاجیکستان، قرقیزستان، قزاقستان، روسیه، دریای خزر، هند، چین و دیگر کشورهای شرق آسیا را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از سوی دیگر آلاینده‌ها روی دریای خلیج فارس و دریای عمان پخش شده و کشورهای قطر، امارات متحده، عمان، یمن و بخشی از عربستان و همچنین دریای سرخ را آلوده می‌کنند. سپس آلاینده‌ها در قارهٔ آفریقا نهشت کرده و کشورهای شرقی آفریقا مانند سومالی و بخش‌هایی از اتیوپی، کنیا و تانزانیا را آلوده می‌کنند.

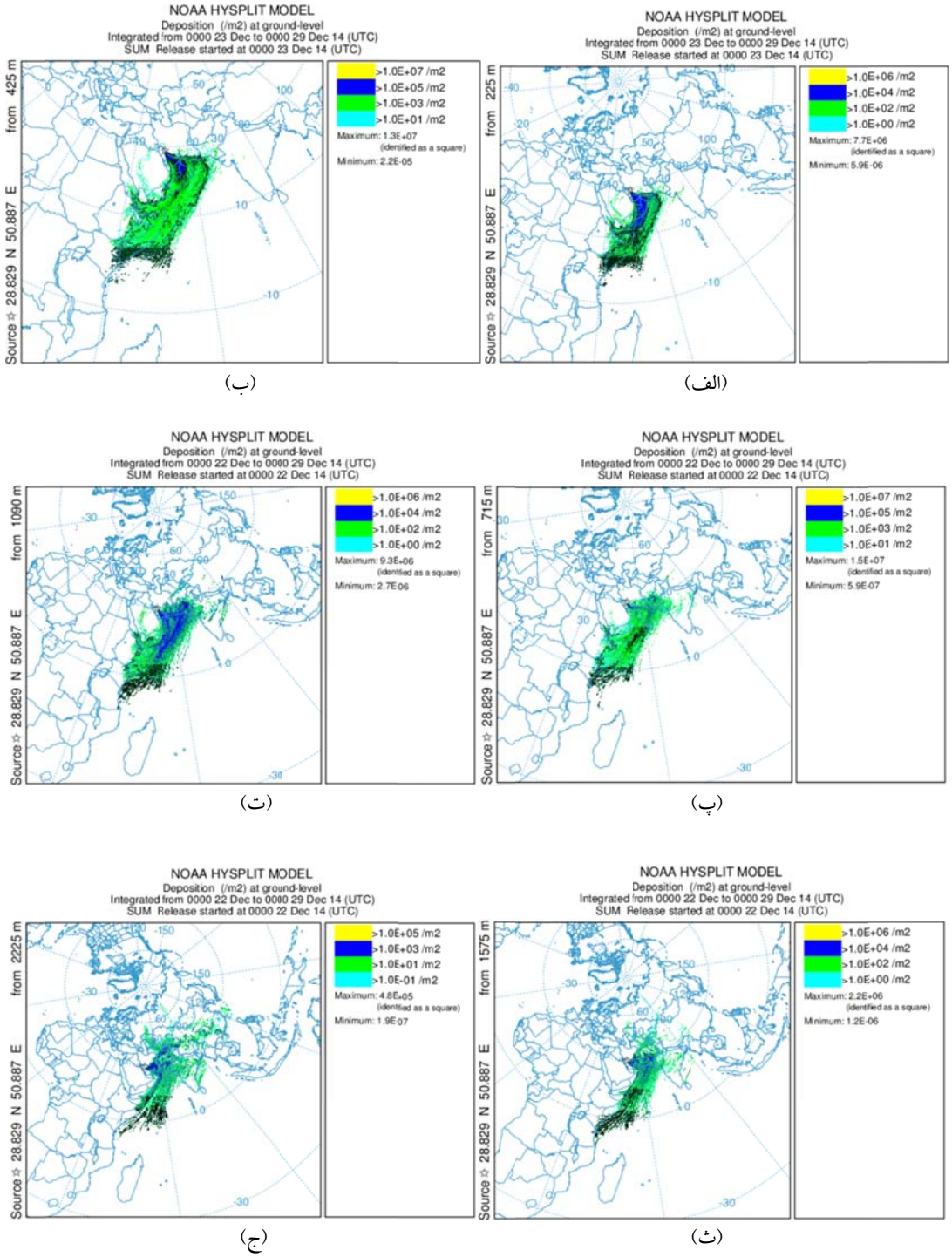
دو هفته بعد از وقوع حادثه، بخشی از آلاینده‌های هسته‌ای پس از گذشتن از شرق آسیا به قارهٔ آمریکا می‌رسند و در آمریکای شمالی نهشت می‌کنند. بخش دیگری از آلاینده‌ها نیز در قارهٔ آفریقا پخش شده و بعد از گذشت تقریباً یک ماه از وقوع حادثه در آمریکای جنوبی نهشت می‌کنند. در این مدت آلاینده‌های هسته‌ای اروپا و حتی استرالیا را نیز آلوده می‌کنند. بنابراین در این حادثه کل قاره‌ها تحت تأثیر مواد پرتوزای رهاشده از نیروگاه بوشهر قرار می‌گیرند. شکل ۱۱ مسیر انتقال آلاینده‌های هسته‌ای یک ماه بعد از این حادثه را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مسیر انتقال مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاعات مختلف، یک هفته بعد از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳، مواد پرتوزای رهاشده در روز اول و از ارتفاعات ۷۱۵، ۱۰۹۰، ۱۵۷۵ و ۲۲۲۵ متری به‌ترتیب مسیر مشخص‌شده با رنگ قرمز، آبی، سبز و فیروزه‌ای در شکل ۹-الف را طی می‌کنند. موادی که در روز دوم از ارتفاعات ۲۲۵ و ۴۲۵ متری رها می‌شوند، به‌ترتیب مسیری را طی می‌کنند که در شکل ۹-ب با رنگ قرمز و آبی نشان داده شده است.

www.SID.ir

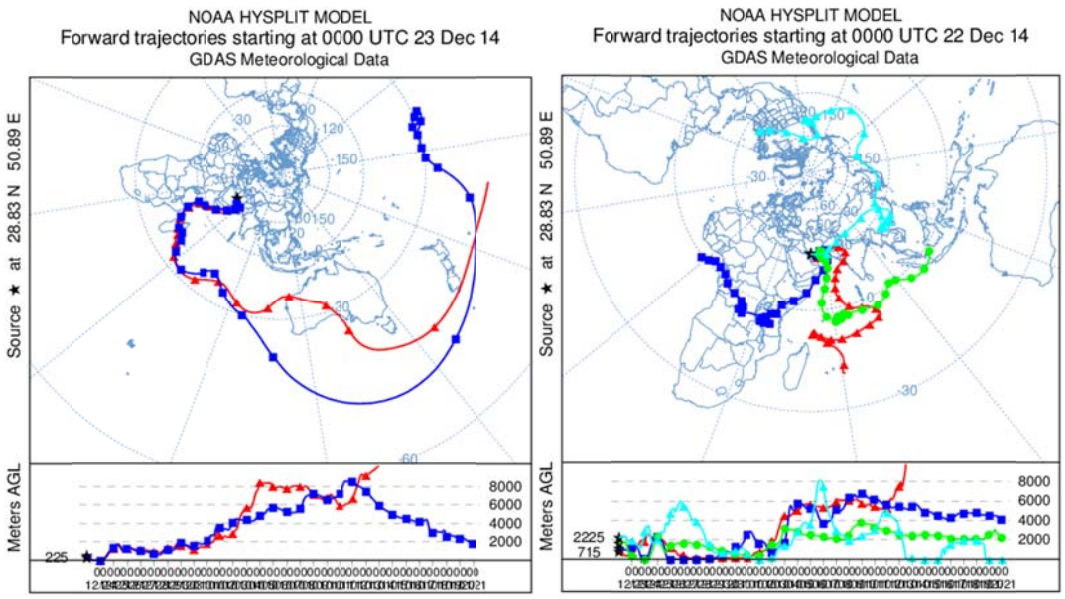
Archive of SID



شکل ۱۰. شبیه‌سازی انتقال و نهشت مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاعات مختلف؛ الف: ۲۲۵، ب: ۴۲۵، پ: ۷۱۵، ت: ۱۰۹۰، ث: ۱۵۷۵ و ج: ۲۲۲۵ متر در یک هفته بعد از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳.

www.SID.ir

Archive of SID



(ب) (الف)

شکل ۱۱. مسیر انتقال مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاعات مختلف، یک ماه بعد از وقوع حادثه در اول دی ۱۳۹۳؛ الف: مسیر انتقال مواد پرتوزای رهاشده در روز اول و از ارتفاعات ۷۱۵، ۱۰۹۰، ۱۵۷۵ و ۲۲۲۵ متری، ب: مسیر انتقال مواد پرتوزای رهاشده در روز دوم که از ارتفاعات ۲۲۵ و ۴۲۵ متری رها می‌شوند.

۴-۴. مقایسهٔ حادثهٔ فرضی اول دی ۱۳۹۳ با حوادث فرضی دیگر در نیروگاه بوشهر

اگر حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر در اول فروردین ۱۳۹۴ اتفاق بیفتد، در زمان وقوع حادثه زبانهٔ یک سامانهٔ پرفشار در ایران وجود دارد که بر روند پخش و انتقال مواد هسته‌ای انتشار یافته از این حادثه تأثیر می‌گذارد و آن‌ها را در جهت شمال شرقی و شمال غربی نیروگاه منتقل می‌کند. در این حادثه، آلاینده‌های هسته‌ای مناطق شمالی استان بوشهر را آلوده می‌کنند که برعکس حادثهٔ اول دی ۱۳۹۳ است. بر اساس شکل ۱۲-الف، آلاینده‌ها به داخل کشور پخش شده و استان‌های زیادی از جمله فارس، خوزستان، یزد، کهگیلویه و بویراحمد، قزوین، گیلان و خراسان‌شمالی را آلوده می‌کنند. بعد از یک ماه، تقریباً کل ایران به جز مناطق شمال غربی تحت تأثیر مواد هسته‌ای رهاشده از این حادثه قرار می‌گیرند.

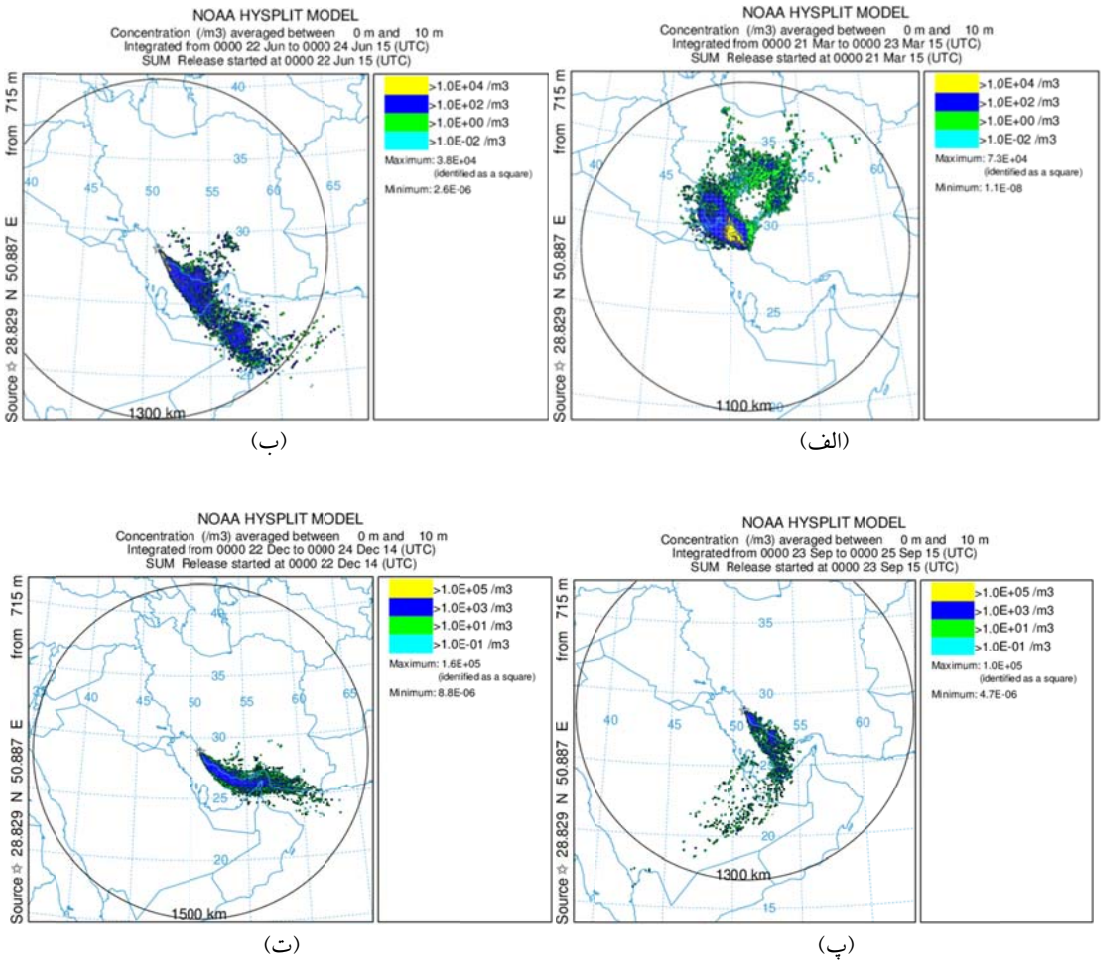
اگر حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر در اول تیر ۱۳۹۴ اتفاق بیفتد، در زمان وقوع حادثه، ایران تحت تأثیر زبانه‌های دو سامانهٔ کم‌فشار در بخش جنوبی و شمال شرقی، زبانه‌های یک سامانهٔ پرفشار از سمت غرب و شمال غرب و همچنین زبانه‌های یک سامانهٔ پرفشار دیگر از سمت شرق قرار دارد. زبانه‌های سامانهٔ پرفشار از سمت غرب و شمال غرب باعث می‌شوند که مواد پرتوزا مطابق شکل ۱۲-ب، در جهت جنوب شرقی نیروگاه حرکت کنند. هسته‌های پرتوزا مناطق جنوبی استان بوشهر را آلوده کرده و به استان فارس و هرمزگان وارد می‌شوند. وجود زبانه‌های سامانهٔ پرفشار از سمت غرب و شمال غرب، پخش و انتقال مواد هسته‌ای در این حادثه را مشابه حادثهٔ اول دی ۱۳۹۳ کرده است. با گذشت زمان و تأثیر سامانه‌های فشاری دیگر، پخش هسته‌های پرتوزا در ایران با حادثهٔ اول دی متفاوت می‌شود؛ به‌طوری که در حادثهٔ اول تیر تقریباً کل ایران به جز بخشی از مناطق غربی تحت تأثیر آلاینده‌های هسته‌ای قرار می‌گیرند.

اگر حادثهٔ راکتور بوشهر در اول مهر ۱۳۹۴ اتفاق بیفتد، در زمان وقوع حادثه یک سامانهٔ پرفشار در ایران و یک سامانهٔ کم‌فشار نیز روی دریای خلیج فارس، دریای عمان و کشورهای عربی حوزهٔ خلیج فارس وجود دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

همان‌طور که در شکل ۱۲-پ دیده می‌شود، مواد پرتوزای رهاشده از این حادثه تحت تأثیر سامانه‌های فشاری در جهت جنوب شرقی نیروگاه حرکت می‌کنند. مانند حوادث اول دی و اول تیر، در این حادثه نیز هسته‌های پرتوزا مناطق جنوبی استان بوشهر را آلوده کرده و به استان فارس و هرمزگان وارد می‌شوند. در ادامه، به‌دلیل تأثیر سامانهٔ کم‌فشار، آلاینده‌های هسته‌ای به‌سمت کشورهای عربی حرکت می‌کنند. بعد از گذشت یک هفته، مناطق جنوبی و بخشی از مناطق جنوب شرقی ایران آلوده می‌شوند و در این مدت پخش و انتقال آلاینده‌ها در مقایسه با حادثهٔ اول دی ۱۳۹۳ کمتر است. بعد از گذشت یک ماه، پخش و انتقال آلاینده‌های هسته‌ای روی ایران در حادثهٔ اول مهر بیشتر می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در این مدت مناطق بیشتری در مقایسه با حادثهٔ اول دی ماه تحت تأثیر آلاینده‌ها قرار می‌گیرند. در هر سه حادثه بعد از استان بوشهر، بیشترین آلودگی برای مناطق جنوبی ایران مانند جنوب غرب فارس، غرب و شمال غرب هرمزگان است.



شکل ۱۲. شبیه‌سازی انتقال و پخش جوی مواد هسته‌ای رهاشده از ارتفاع ۷۱۵ متری در تراز بین ۰ تا ۱۰ متر هنگامی‌که ۴۸ ساعت از وقوع حادثهٔ فرضی در الف: اول فروردین ۱۳۹۴، ب: اول تیر ۱۳۹۴، پ: اول مهر ۱۳۹۴ و ت: اول دی ۱۳۹۳ می‌گذرد.

www.SID.ir

Archive of SID

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به شبیه‌سازی انتقال، پخش جوی و نهشت آلاینده‌های هسته‌ای رها شده از حادثهٔ فرضی نیروگاه بوشهر در اول دی‌ماه ۱۳۹۳، در بازه‌های زمانی مختلف یک‌ماهه و در ترازهای مختلف با استفاده از مدل HYSPLIT پرداخته شد. نتایج شبیه‌سازی در بازهٔ زمانی یک ماهه نشان می‌دهد که مواد هسته‌ای رها شده از این حادثه، شهرستان‌های تنگستان، دشتی، دیر، کنگان، جم و عسلویه را بیشتر از مناطق دیگر آلوده می‌کنند و بیشینهٔ نهشت آلاینده‌های هسته‌ای در مناطق ساحلی شهرستان تنگستان است. روستای ساحلی کلات واقع در شهرستان تنگستان یکی از مناطق مورد بررسی است که بیشینهٔ نهشت مواد پرتوزای ورودی به این روستا $۱٫۵۱\times۱۰^{۶}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ و بیشینهٔ غلظت در ارتفاع ۱۰ متری آن نیز $۱٫۹۰\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۳}}$ است.

سامانه‌های فشاری که ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به‌ویژه زبانه‌های یک سامانهٔ پرفشار از سمت غرب و شمال غرب، باعث می‌شوند که آلاینده‌های هسته‌ای رها شده از این حادثه در مناطق جنوبی، جنوب شرقی، شرقی و بخشی از مناطق شمال شرقی ایران بیشترین تأثیر را داشته باشند. در ایران بیشترین آلودگی هسته‌ای در شهرهای لامرد و بندرعباس است. در اولین روز حادثه، بیشینهٔ غلظت مواد پرتوزای ورودی به لامرد در ارتفاع ۱۰ متری $۱٫۴۵\times۱۰^{۴}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ و بیشینهٔ نهشت آن‌ها در این شهر $۹٫۵۸\times۱۰^{۵}\ \frac{Bq}{m^{۲}}$ است.

در مدت یک ماه، نه تنها ایران بلکه بیشتر کشورهای آسیایی آلوده می‌شوند. پخش و انتقال هسته‌های پرتوزای انتشاریافته از این حادثه فراتر از آسیا بوده و آلاینده‌های هسته‌ای بخشی از قارهٔ آفریقا، آمریکا، اروپا و حتی استرالیا را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین در این حادثه کل قاره‌ها تحت تأثیر مواد پرتوزای رها شده از نیروگاه بوشهر قرار گرفته‌اند.

همچنین در این مقاله، حادثهٔ فرضی راکتور بوشهر در اول دی ماه ۱۳۹۳ با حوادث فرضی نیروگاه بوشهر در اول فروردین، اول تیر و اول مهر ۱۳۹۴ مقایسه شده است. به‌دلیل تأثیر تقریباً یکسان سامانه‌های فشاری بر نیروگاه بوشهر، پخش و انتقال مواد هسته‌ای رها شده از حادثهٔ اول تیر و حادثهٔ اول مهر در جهت جنوب شرقی نیروگاه است که با حادثهٔ اول دی تقریباً مشابه می‌باشد. با گذشت زمان، سامانه‌های فشاری پخش و انتقال مواد هسته‌ای را متفاوت کرده است، به‌طوری که بعد از گذشت یک هفته بیشترین آلودگی هسته‌ای روی ایران به حادثهٔ اول تیر و کمترین آلودگی به حادثهٔ اول مهر مربوط است. در هر سه حادثه بعد از استان بوشهر، بیشترین آلودگی به مناطق جنوبی ایران مانند جنوب غرب فارس، غرب و شمال غرب هرمزگان مربوط است. از نتایج این پژوهش، تحت شرایط جوی مشابه می‌توان در فوریت‌های هسته‌ای نیروگاه بوشهر استفاده کرد.

مراجع

قادر، س.، صدیق‌زاده، ا.، یوسفی، ح. و صبری، ر.، ۱۳۹۱، شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های خروجی از دودکش نیروگاه بوشهر، مجموعه مقالات پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اردیبهشت، صفحه ۲۹-۳۲.

Ap-Simon, H. and Wilson, J. J., 1986, Tracking the cloud from Chernobyl, New Scientist, 17, 42-45.

Brandt, H., Christensen, J. H. and Frohn, L. M., 2002, Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model, Atmos. Chem. Phys., 2, 397–417.

Draxler, R. R., 1999, HYSPLIT4 User's Guide. NOAA Tech. Memo, ERL ARL-230, NOAA/ Air Resources Laboratory, Silver Spring.

Draxler, R. R., 2004, HYSPLIT PC training seminar, National Oceanic and Atmospheric Administration, 10 June.

Draxler, R. R., Ginoux, P. and Stein, A. F., 2010, An empirically derived emission algorithm for wind blown dust. J. Geophys. Res. Atmos. 115, D16212.

www.SID.ir

Archive of SID

Draxler, R. R. and Hess, G. D., 1997, Description of the HYSPLIT_4 Modeling System, NOAA Tech. Memo. ERL-ARL-224. NOAA/Air Resources Laboratory, Silver Spring.

Draxler, R. R. and Hess, G. D., 1998, An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. Aust. Meteor. Mag. 47, 295-308.

Draxler, R. R. and Rolph, G. D., 2010, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring.

Draxler, R. R. and Rolph, G. D., 2012, Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. J. Geophys. Res. Atmos 117.

Fei, J. F., Wang, P. F., Cheng, X. P., Huang, X. G. and Wang, Y., 2014, A regional simulation study on dispersion of nuclear pollution from the damaged Fukushima Nuclear Power Plant, Science China: Earth Sciences, 57. 1513–1524.

Hernandez-Ceballos, M. A., Hong, G. H., Lozano, R. L., Kim, Y. I., Lee, H. M., Kim, S. H., Yeh, S. W., Bolivar, J. P. and Baskaran, M., 2012, Tracking the complete revolution of surface westerlies over Northern Hemisphere using radionuclides emitted from Fukushima, Science of the Total Environment, 438. 80–85.

Hong, G. H., Hernandez-Ceballos, M. A., Lozano, R. L., Kim, Y. I., Lee, H. M., Kim, S. H., Yeh, S. W., Bolivar, J. P. and Baskaran, M., 2012, Radioactive impact in South Korea from the damaged nuclear reactors in Fukushima: evidence of long and short range transport, J. Radiol. Prot, 32. 397–411.

Jung, G., Kim, J. and Shin, H., 2007, HYSPLIT's Capability for Radiological Aerial Monitoring in Nuclear Emergencies: Model Validation and Assessment on the Chernobyl Accident, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting PyeongChang, Korea.

Kindap, T., Turuncoglu, U. U., Chen, S. H., Unal, A. and Karaca, M., 2008, Potential Threats from a Likely Nuclear Power Plant Accident: a Climatological Trajectory Analysis and Tracer Study, Water Air Soil Pollut. Liu, L. B., Wu, S., Cao, J., Xie, F., Shi, Q. L., Zhang, C. Y., Tang, H. B., He, X. B., Zhang, R., Chen, L., Wei, G. Y., Zhang, Z. H., Zhang, J. M., Dang, H., 2013, Monitoring of atmospheric radionuclides from the Fukushima nuclear accident and assessing their impact on Xi'an, China, Chin Sci Bull, 58, 1585-1591.

Rolph, G. D., Draxler, R. R., Stein, A. F., Taylor, A., Ruminski, M. G., Kondragunta, S., Zeng, J., Huang, H., Manikan, G., McQueen, J. T. and Davidson, P. M., 2009, Description and verification of the NOAA smoke forecasting system: the 2007 fire season. Weather Forecast. 24, 361-378.

Sandalls, F. J., Segal, M. G. and Victorova, N., 1993, Hot particles from Chernobyl: a review. Journal of Environmental Radioactivity, 18, 5–22.

Stein, A. F., Rolph, G. D., Draxler, R. R. and Stunder, B., 2009, Verification of the NOAA smoke forecasting system: model sensitivity to the injection height. Weather Forecast. 24, 379-394.

Stunder, B. J. B., Heffter, J. L. and Draxler, R. R., 2007, Airborne volcanic ash forecast area reliability. Weather Forecast. 22, 1132-1139.

Swanberg, E. L. and Hoffert, S. G., 2001, Using atmospheric 137Cs measurements and HYSPLIT to confirm chernobyl as a source of 137Cs in Europe, 23rd Seismic Research Review: Worldwide Monitoring of Nuclear Explosions – October 2-5.

Takemura, T., Nakamura, H., Takigawa, M., Kondo, H., Satomura, T., Miyasaka, T. and Nakajima, T., 2011, Simulation of Global Transport of Particles from the Fukushima Nuclear Power Plant, SOLA, 7, 101−104.

Unver, O., 2003, A modelling study for the health risk posed by Nuclear Power Plant in Bulgaria at different parts of Turkey, a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of the Middle East technical university, December.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 43, No. 3, Autumn 2017, P. 13

Simulation of atmospheric dispersion, transport and deposition of nuclear pollutants released from a hypothetical accident at Bushehr Power Plant

Kaviani, F.[1], Memarian, M. H.[2*] and Eslami-Kalantari, M.[2]

1. M.Sc. Student, Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 20 Jun 2016, Accepted: 24 Jan 2017)

Summary

Chernobyl and Fukushima nuclear accidents showed that nuclear accident is not an issue of regional scale and radioactive nuclei disperse and transport faraway under atmospheric conditions. They have a lot of damage, undesirable and dangerous long term effects on the environment and human health. Given the importance of this issue, in this paper, the simulation of atmospheric dispersion, transport and deposition of nuclear materials released from a hypothetical accident in Bushehr nuclear power plant have been studied using HYSPLIT. The hypothetical accident at Bushehr nuclear power plant is based on world's largest nuclear accident, the Chernobyl accident. In this study, it is assumed that the accident in Bushehr nuclear plant occurred on 22 December 2014. Most important radioactive nuclei namely Cesium-137, Iodine-131, Strontium-90, Plutonium-239 and Tellurium-132 are used in this simulation. Release of the radioactive materials is different into the environment. So that, 30% of the cesium-137, 55 % of the Iodine-131, 5 % of the Strontium-90, 3.5 % of the Plutonium-239 and 40 % of the Tellurium-132 contained in the reactor core are released. The accident is controlled for three days. The emission rate of radioactive materials is also different in these days. So, 60 %, 30 % and 10 % of nuclear pollutants are released into the environment, respectively in the first day, the second day and the third day. Given speed and energy of pollutants exit from reactor, they are placed in different heights. The approximate release heights are determined based on the Chernobyl accident. The release heights are 225, 425, 715, 1090, 1575 and 2225 meters. The amount of pollutants that are placed at any height is also different.

Simulation of atmospheric dispersion, transport and deposition of radioactive materials released in the accident is performed for 1, 10, 24, 48, 168, 336 and 720 hours at different levels. In this paper, the atmospheric dispersion, transport and deposition of nuclear pollutants is investigated over Bushehr province, Iran and the world separately. In addition, the hypothetical accident of Bushehr reactor in 22 December 2014 are compared with the hypothetical accidents of Bushehr reactor in 21 March, 22 June and 23 September 2015.

The simulation results show that in the period of one month, the nuclear materials released from the accident polluted Tangestan, Dashti, Dayyer, Kangan, Jam and Asaloyeh more than other regions in Bushehr province and the maximum deposition of nuclear pollutants is in the coastal areas Tangistan.

The simulation results show that a week after the accident, nuclear pollutants are polluted southern, southeastern, eastern and part of northeastern areas of Iran thoroughly and they also affected neighbouring some countries. On the other hand, nuclear materials polluted Red Sea. Two weeks after the event, part of the pollutants entered the continent of America after crossing East Asia and they are deposited in North America. Another part of the pollutants also dispersed in the African continent and after a month of the event they are deposited in South America.

In Iran, Lamerd and Bandar Abbas have the maximum of nuclear pollutants concentration. In Lamerd, on the first day, the maximum concentration of radioactive materials at ground level and the heights 10 meters is $9.58\times10^{5}\,\frac{Bq}{m^{2}}$ and $1.45\times10^{4}\,\frac{Bq}{m^{3}}$, respectively.

Comparing the hypothetical accident of Bushehr reactor in 22 December 2014 with the hypothetical accidents of Bushehr reactor in 21 March, 22 June and 23 September 2015 show that the dispersion and transport of radioactive materials released from accident of 22 December 2014 is almost similar with the hypothetical accidents of Bushehr reactor in 22 June and 23 September 2015, because the pressure systems have the same effects on Bushehr plant. With passing time, the dispersion and transport of nuclear pollutants is different. But in every three incidents, the most pollution is over the southern regions of Iran. The results of this study under similar atmospheric conditions will be applicable to use in Bushehr nuclear plant emergencies.

Keywords: Nuclear pollutants, Atmospheric dispersion, Bushehr Power Plant, Simulation, HYSPLIT.

*Corresponding author: memarian@yazd.ac.ir

www.SID.ir