

## الگوهای پراکندگی مواد پرتوزای رهاشده در اثر وقوع سوانح در نیروگاه‌های هسته‌ای اطراف ایران

کمال مصطفی نژاد<sup>۱</sup>، محمدرضا کاردان<sup>۲</sup>، حسین آفریده<sup>۳</sup>، میترا اطهری علاف<sup>۱</sup>، اسد باباخانی<sup>۲</sup> و ایوب بنوشی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

\* تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶

پست الکترونیکی: abanoushi@aeoi.org.ir

### چکیده

مواد پرتوزای خروجی از یک نیروگاه در زمان وقوع سانحه تحت تأثیر جریان‌های جوی تا سرزمین‌های دوردست نیروگاه نیز ممکن است پراکنده شوند. برای پیش‌بینی چگونگی این پراکنش مدل‌هایی پیشنهاد شده است. این مقاله بخشی از نتایج پژوهشی را گزارش می‌کند که در آن، با استفاده از یکی از این مدل‌ها به نام مدل HYSPLIT، الگوهای توزیع بعضی از ایزوتوپ‌های پرتوزای سزیم و ید از ده نیروگاه واقع در ۲۰ تا ۵۰ درجه‌ی عرض شمالی (N) و ۲۵ تا ۷۵ درجه‌ی طول شرقی (E) مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که همگی این نیروگاه‌ها می‌توانند در صورت آسیب دیدن جدی، کشور ایران را نیز آلوده کنند. بدین‌سان، تمهیداتی که برای مقابله با حوادث هسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند باید نه تنها نیروگاه بوشهر، که کل نیروگاه‌های این منطقه را نیز به حساب آورند. نتایج این شبیه‌سازی می‌تواند برای جابجایی ایستگاه‌های هشدار آنی مواد پرتوزا به کار گرفته شود.

کلیدواژه‌گان: نیروگاه هسته‌ای، ایران، پراکندگی مواد پرتوزا، مدل HYSPLIT.

### ۱. مقدمه

مقررات زیر ترازهایی که مراجع قانونی تعیین می‌کنند نگاه داشته می‌شود. با وجود این و با وجود تدابیر حفاظتی سخت-گیرانه‌ای که برای ساخت نیروگاه‌ها و هنگام کار آن‌ها اندیشیده

تأسیسات چرخه‌ی سوخت هسته‌ای و به‌ویژه نیروگاه‌های هسته‌ای در زمان کار عادی شان میزانی مواد پرتوزا در فضای اطراف خود رها می‌کنند. این میزان با تدابیر فنی و تنظیم

شده است؛ همواره باید وقوع سوانح کوچک و بزرگ را در این نیروگاه‌ها انتظار داشت تا بتوان در صورت وقوع آن‌ها از شدت آسیب‌های احتمالی کاست.

حوادث نیروگاهی ممکن است در اثر عواملی خارجی مانند زلزله یا عملیات تروریستی رخ دهد؛ یا ممکن است در اثر خرابی‌های داخلی ناشی از کارکرد اشتباه تجهیزات و خطاهای انسانی باشد. حادثه‌ی فوکوشیما [۱] از حوادث دسته‌ی نخست و حادثه‌ی شناخته‌شده‌ی چرنوبیل [۲، ۳] از حوادث دسته‌ی دوم به‌شمار می‌آیند. سوانحی از این دست می‌توانند حجم بسیار بزرگی از مواد پرتوزا را در فضا پراکنده کنند. این مواد پرتوزا ممکن است تنها نزدیکی محل سانحه و یا صدها و شاید هزارها کیلومتر دورتر را نیز آلوده کنند. این پراکندگی آلودگی عمدتاً در اثر جریان‌های جوی رخ می‌دهد. به همین دلیل، شناخت این جریان‌ها برای پیش‌بینی چگونگی و شدت آلودگی‌ها در مناطق مختلف ضروری است.

حتی در صورت شناخت جریان‌های جوی نیز، استفاده از آن‌ها برای مسیریابی آلودگی‌ها کاری سراسر نیست و حتی با وجود رایانه‌های امروزی، نیاز به محاسباتی زمان‌بر دارد. به این ترتیب، شبیه‌سازی وقوع سوانح نیروگاهی برای نیروگاه‌های در حال ساخت نیز ضروری است. به‌همین دلیل، به‌ویژه پس از حادثه‌ی چرنوبیل، مدل‌هایی برای ردیابی آلودگی‌های هسته‌ای به‌کار گرفته شده‌اند و تحقیقات متنوعی در این رابطه انجام شده است (برای نمونه مراجعه کنید به [۶-۴]).

با وجود این، در این تحقیقات کم‌تر به منطقه‌ی جغرافیایی‌ای که کشور ایران در آن واقع است پرداخته شده است. در اندک پژوهش‌هایی نیز که در این ارتباط انجام شده است تنها یک راکتور [۷] یا یک نیروگاه هسته‌ای (نیروگاه هسته‌ای بوشهر) [۸- ۱۰] به‌عنوان منبع آلودگی به‌حساب آمده است؛ این در حالی است که چندین نیروگاه در کشورهای

همسایه‌ی ایران در حال فعالیت یا در حال ساخت هستند و در صورت وقوع سوانح بزرگ در آن‌ها خطر آلودگی فضای ایران وجود دارد. از این‌رو، پژوهش در این‌باره ضروری به‌نظر می‌رسد. این مقاله بخشی از نتایج چنین پژوهشی را گزارش می‌کند.

در این مقاله، چگونگی توزیع آلودگی‌های پرتوزای ناشی از سوانح ممکن در نیروگاه‌های هسته‌ای مجاور کشور ایران بررسی شده است.

به این منظور، ابتدا در بخش ۲، نیروگاه‌های هسته‌ای‌یی که به‌عنوان منابع بالقوه‌ی آلودگی برای ایران شناسایی شده‌اند، معرفی می‌شوند. در بخش ۳، مدل‌های مختلفی که برای پخش هوا برد مواد پرتوزا ارائه شده‌اند مرور می‌شوند. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای نیروگاه‌های بخش ۲ ارائه می‌شود. بالاخره در بخش ۵، نتایج به‌دست آمده خلاصه می‌شود.

## ۲. منابع آلودگی

نیروگاه‌های هسته‌ای در حال کار عادی و به‌ویژه هنگام وقوع سوانح می‌توانند انواع مواد پرتوزا در فضای اطراف خود پراکنده کنند. بعضی از این مواد پرتوزا مانند استرانسیم یا پلوتنیم به‌دلیل سنگین‌بودن در نزدیکی نیروگاه (کم‌تر از ۱۰۰ km) نشست می‌کنند و بعضی دیگر به‌دلیل نیمه‌عمر کوتاه‌شان آن‌قدر دوام ندارند که مناطق دوردست نیروگاه را بیالایند. با وجود این، ایزوتوپ‌های پرتوزایی مانند ید ۱۳۱ (با نیمه‌عمر ۸ روز)، سزیم ۱۳۷ (با نیمه‌عمر ۳۰ سال)، و سزیم ۱۳۴ (با نیمه‌عمر ۲ سال) می‌توانند تحت تأثیر سامانه‌های جوی بین قاره‌ای تا فواصل بسیار دوری در حد چند صد کیلومتر هم پراکنده شوند. در حادثه‌ی چرنوبیل، این مواد حدود ۱۵ درصد کل مواد پرتوزای ره‌اشده را تشکیل دادند [۳]. به این ترتیب،

## ۱.۲. برآورد فعالیت رهاشده در اثر سانحه

منظور از آهنگ گسیل مواد پرتوزا مقدار فعالیت (اکتیویته-ای) است که در واحد زمان در فضا منتشر می‌شود. این کمیت به فعالیت بستگی دارد که از ابتدا در راکتور وجود دارد که آن نیز تابعی از مشخصات و قدرت راکتور است. برای پیش‌بینی مقدار فعالیت رهاشده منطقی است که با فرض بدترین سانحه-ی ممکن، بیشینه‌ی فعالیت موجود در یک راکتور در نظر گرفته شود.

مقدار فعالیت پاره‌های شکافت موجود در یک راکتور در  $t$  روز پس از شروع به کار راکتور ( $A$ ) از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید [۱۲].

$$A = 1.46P_0 \left[ (t - T_0)^{-0.2} - t^{-0.2} \right] \quad (1)$$

که در آن  $P_0$  توان حرارتی راکتور برحسب  $W$ ، و  $T_0$  مدت کار راکتور تا زمان خاموشی برحسب روز است. تجربه‌ی چرنوبیل نشان داده است که در اثر وقوع سانحه حدود ۰/۱۶ این مقدار در جو رها می‌شود [۴].

جدول ۲ فعالیت سه ایزوتوپ پرتوزای اصلی رهاشده در اثر یک سانحه‌ی فرضی را برای هریک از نیروگاه‌های هسته‌ای جدول ۱ که با این روش محاسبه شده است نشان می‌دهد. فعالیت مربوط به عواملی غیر از پاره‌های شکافت به حساب نیامده است؛ زیرا نقش این عوامل در مقایسه با پاره‌های شکافت بسیار ناچیز است و به حساب آوردن آن‌ها محاسبات را بی‌جهت افزایش می‌دهد.

خروج مواد پرتوزا از نیروگاه سانحه‌دیده می‌تواند چند روزی ادامه یابد (برای چرنوبیل ده روز). به این ترتیب، برای یافتن آهنگ خروج مواد پرتوزا (برحسب  $Bq/h$ ) یک تقریب سراسر می‌تواند این باشد که کل فعالیت رهاشده بر ساعات رهاسازی تقسیم شود.

نیروگاه‌های هسته‌ای مستقر در سرزمین‌های مجاور یک کشور نیز می‌توانند، در صورت بروز سانحه، برای آن کشور آلودگی محیطی تولید کنند. سرزمین ایران در منطقه‌ی جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه‌ی طول شرقی قرار دارد. نیروگاه‌هایی که می‌توانند یک منبع تولید آلودگی جدی برای این منطقه باشند بین حدود ۲۰ تا ۵۰ درجه‌ی عرض شمالی و بین حدود ۲۵ تا ۷۵ درجه‌ی طول شرقی هستند. نیروگاه‌های مستقر در این منطقه در جدول ۱ فهرست شده است.

مهم‌ترین سوانحی که می‌توانند مقادیر عمده‌ای مواد پرتوزا تولید کنند عبارت‌اند از سانحه‌ی افزایش ری‌اکتیویته (reactivity initiated accident - RIA) و سانحه‌ی فقدان خنک‌کننده (loss of coolant accident - LOCA) [۱۱]. بدترین شرایط هنگامی رخ می‌دهد که، مانند حادثه‌ی نیروگاه چرنوبیل در اوکراین، قلب راکتور ذوب، و پاره‌های شکافت به بیرون قلب نشت کنند. در این شرایط، احتمال دارد مواد پرتوزا وارد جو شوند.

جدول (۱): نیروگاه‌های واقع در ناحیه‌ی جغرافیایی ۲۰ تا ۵۰ درجه‌ی عرض شمالی (N) و ۲۵ تا ۷۵ درجه‌ی طول شرقی (E).

نام نیروگاه	مختصات مکانی
Rostov (روسیه)	۴۷/۶۰ N و ۴۲/۳۷ E
Sinop (ترکیه)	۴۲/۰۲ N و ۳۵/۰۹ E
Metsamor1 (ارمنستان)	۴۰/۱۸ N و ۴۴/۱۴ E
Metsamor2 (ارمنستان)	۴۰/۱۸ N و ۴۴/۱۴ E
Akkuyu (ترکیه)	۳۶/۱۶ N و ۳۳/۵۵ E
Chasnupp (پاکستان)	۳۲/۳۹ N و ۷۱/۴۷ E
دارخوین (ایران)	۳۰/۷۱ N و ۴۸/۳۸ E
بوشهر (ایران)	۲۸/۸۳ N و ۵۰/۵۰ E
Kanupp (پاکستان)	۲۴/۸۵ N و ۶۶/۷۹ E
Barakah (امارات متحده‌ی عربی)	۲۳/۹۷ N و ۵۲/۲۴ E

## ۳. پراکنش مواد پرتوزا

مدل‌های بلندبرد، برخلاف مدل‌های کوتاه‌برد، نقش عوارض طبیعی در نشست مواد پرتوزا به حساب می‌آید؛ تراکم مواد پرتوزا، نه تنها روی سطح زمین، که در هر ارتفاعی و در لایه‌های مختلف جوّی قابل محاسبه است و در شرایط عادی و در شرایط سانحه می‌شود از آن‌ها استفاده کرد.

بعضی از مدل‌های بلندبرد مشهور از این قرارند:

- the air pollution model (TAPM)

- flexible particle dispersion model (FLEXPART)

- dose related effects assessment model (DREAM)

- Danish emergency response model (DERMA)

- Numerical Atmospheric dispersion Modeling

- Environment (NAME)

- Comprehensive Air Quality Model with

Extensions (CAM<sub>x</sub>) و

hybrid single-particle lagrangian integrated

- trajectory (HYSPLIT)

در این مطالعه، با توجه به همه‌ی ملاحظات موجود، مدل HYSPLIT [۱۵] برای شبیه‌سازی انتخاب شد. این مدل، که توسط سازمان جهانی مدیریت آتمسفر و اقیانوس‌ها در دسترس قرار گرفته است:

- قادر است پراکنش همه‌ی آلاینده‌های جوی، از جمله آلاینده‌های

پرتوزا را شبیه‌سازی کند.

- بر اساس معادلات لاگرانژی، اویلری، و گاوسی نوشته شده است.

- پخش ابرهای پرتوزا، کاستی حاصل از پرتوزایی و نشست ذره‌ای را به حساب می‌آورد.

- امکان استفاده از داده‌های هواشناسی NCEP را فراهم می‌کند.

حادثه‌ی نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل در سال ۱۳۶۵ ه. (۱۹۸۶ م.) در اوکراین بسیاری از همسایگان این کشور را، به‌ویژه در اروپا، تحت تأثیر قرار داد. این رخداد سازمان‌های جهانی را برانگیخت که به دنبال یافتن مدل‌هایی برای پیش‌بینی پراکنش مواد پرتوزای ناشی از سوانح هسته‌ای باشند. از آن سال تاکنون مدل‌های مختلفی ارائه شده است [۱۳] که می‌توان آن‌ها را برپایه‌ی وسعت منطقه‌ای که می‌تواند پوشش دهند دسته‌بندی کرد.

بر این اساس، دو گونه مدل وجود دارد؛ یکی مدل‌های کوتاه‌برد و دیگری مدل‌های بلندبرد. مدل‌های کوتاه‌برد آن‌هایی هستند که شعاع منطقه‌ی تحت پوشش‌شان از صد کیلومتر کم‌تر است. در این مدل‌ها فرض می‌شود که با افزایش فاصله از منبع تولید مواد پرتوزا، تراکم این مواد تنها به سه دلیل کاهش یابد که عبارت‌اند از واپاشی پرتوزا، جذب در هوا، و نشست بر سطح زمین در اثر بارندگی. در این مدل‌ها، تغییرات تراکم مواد پرتوزا با افزایش فاصله تا منبع از تابعی گوسی تبعیت می‌کند [۱۴].

بعضی از مدل‌های کوتاه‌برد مشهور از این قرارند:

- clean air act assessment package (CAP88)

- radiological assessment system for consequences

و analysis (RASCAL)

- Consequence assessment package for use on a PC

-(PC-COSMYA)

مدل‌های بلندبرد آن‌هایی هستند که برای پراکنش مواد پرتوزا تا فواصل چند هزار کیلومتری نیز کاربرد دارند. در

جدول (۲): مقدار فعالیت رهاشده از نیروگاه‌های جدول ۱ در صورتی که حادثه‌ای نظیر حادثه‌ی نیروگاه چرنوبیل در آن‌ها رخ دهد.

نام نیروگاه	فعالیت کل پاره‌های شکافت ( $\times 10^{20}$ Bq)		کل فعالیت رهاشده در جو ( $\times 10^{18}$ Bq)		فعالیت رهاشده در جو ( $\times 10^{18}$ Bq)	
	$^{134}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{131}\text{I}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{131}\text{I}$
Rostov (روسیه)	۱/۴۵	۲۳/۶۴	۳/۵۴	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۱
Sinop (ترکیه)	۱/۸۱	۲۹/۵۰	۴/۴۳	۰/۱۳	۰/۲۱	۰/۱۳
Metsamor1 (ارمنستان)	۰/۵۴	۸/۸۶	۱/۳۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴
Metsamor2 (ارمنستان)	۱/۳۶	۲۲/۱۷	۳/۳۲	۰/۱	۰/۱۶	۰/۱
Akkuyu (ترکیه)	۱/۶۳	۲۶/۵۷	۳/۹۸	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۱۲
Chasnupp (پاکستان)	۰/۱۷	۲/۷۷	۰/۴۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱
دارخوین (ایران)	۰/۴۵	۷/۴۰	۱/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳
بوشهر (ایران)	۱/۳۶	۲۲/۱۷	۳/۳۲	۰/۱	۰/۱۶	۰/۱
Kanupp (پاکستان)	۰/۴۱	۶/۶۸	۱/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳
Barakah (امارات متحده‌ی عربی)	۱/۹۰	۳۱/۰۶	۴/۶۶	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۱۴

#### ۴. شبیه‌سازی

– داده‌های هواشناسی معتبر. مدل به‌کارگرفته شده در این شبیه‌سازی به کمیته‌های هواشناسی متعددی نیاز دارد. هرچه شمار این کمیته‌ها بیش‌تر باشد، زمان محاسبات طولانی‌تر می‌شود. برآوردهای ما نشان داد که کمیته‌های جدول ۳ حداقل‌هایی هستند که باید در این شبیه‌سازی به‌حساب آیند تا مدل اجرا، و پاسخ‌های قابل اعتماد فراهم شود. بازه‌ی زمانی شبیه‌سازی از دو ماه آخر سال ۲۰۰۸ م. تا پایان شش ماه نخست سال ۲۰۱۰ م.، به‌طول ۲۰ ماه انتخاب شد.

جدول (۳): کمیته‌های هواشناسی مورد نیاز برای شبیه‌سازی.

کمیته	یکا	کمیته	یکا	کمیته	یکا	کمیته	یکا
فشار در سطح	hPa	مقدار بارندگی	mm	شارهای حرارتی	W/m <sup>2</sup>	سرعت باد	m/s
فشار میانگین سطح دریا	hPa	ابرناکی	—	شار موجی	W/m <sup>2</sup>	سرعت تغییر فشار	hPa/s
دما در سطح و ۲ متری	K	شار تکانه	N/m <sup>2</sup>	رطوبت نسبی	—	ارتفاع geopotential	gpm

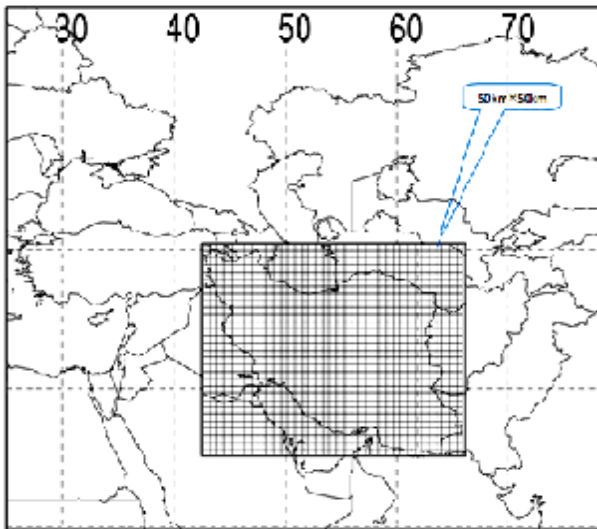
برای شبیه‌سازی پراکنش مواد پرتوزای ناشی از وقوع سانحه در یکی از نیروگاه‌های جدول ۱، ابتدا داده‌های هواشناسی لازم از بانک‌های اطلاعاتی موجود استخراج شد. این داده‌ها دارای فرمت‌های خاصی هستند و برای خواندن آن‌ها به مدل لازم است در این فرمت‌ها تغییراتی داده شود. گام دیگر در شبیه‌سازی مش‌بندی منطقه‌ی تحت بررسی است. هرچه ابعاد مش‌ها کوچک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی بیش‌تر خواهد بود. هزینه‌ی این افزایش دقت مدت‌زمان محاسبه‌ی بیش‌تر است. بدین‌سان، باید در جست‌وجوی ابعاد بهینه برای مش‌ها بود. در این بخش، روشی که برای شبیه‌سازی به‌کار برده شده است، خلاصه می‌شود. جزئیات بیش‌تر در مرجع [۱۷] آمده است.

#### ۱.۴. ورودی‌های مدل

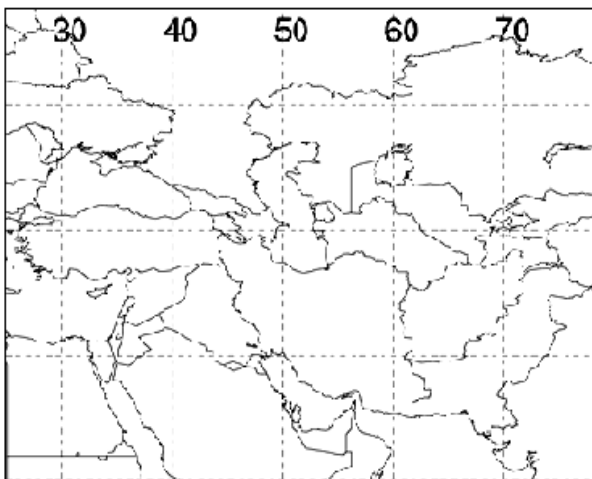
برای استفاده از این مدل، اطلاعات زیر باید در دسترس

باشد:

معادل ۵۰ کیلومتر است، انجام، و در نتیجه سرزمین ایران به ۱۱۱۰ ناحیه (طول = ۳۷ مربع و عرض = ۳۰ مربع) تقسیم شد. داده‌های هواشناسی با تفکیک یک درجه‌ای و برای ناحیه‌ی وسیع‌تری از ۰ تا ۹۰ درجه‌ی شمالی و ۲۰ تا ۹۰ درجه‌ی شرقی برای شبیه‌سازی به‌کارگرفته شد (شکل ۲).



شکل (۱): ناحیه‌ی تحت بررسی در شبیه‌سازی. محدوده‌ی کشور ایران به ۱۱۱۰ پیکسل ۵۰ km × ۵۰ km تقسیم شده است.



شکل (۲): منطقه‌ای که داده‌های هواشناسی برای آن تهیه شده است.

ارتفاع آلودگی. ارتفاع اوج‌گیری قیف آلودگی به ارتفاع محل نیروگاه نسبت به سطح دریا، دمای انفجار، ارتفاع ساختمان نیروگاه پیش از تخریب احتمالی، سرعت بادهای محلی، و سرعت خروج مواد از نیروگاه بستگی دارد. اگرچه فرمول‌هایی برای تخمین ارتفاع قیف آلودگی وجود دارد [۱۶]، استفاده از آن‌ها نیازمند دسترسی به اطلاعاتی است که به‌سادگی میسر نیست؛ از این‌رو، در این شبیه‌سازی، با توجه به ارتفاع قیف آلودگی در انفجار نیروگاه چرنوبیل [۴]، ارتفاع اوج‌گیری ایزوتوپ‌های پرتوزای سزیم و ید بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر در نظر گرفته شد.

آهنگ گسیل آلودگی. برای محاسبه‌ی آهنگ گسیل آلودگی، مدت خروج آلودگی ده روز فرض شد و با تقسیم کل فعالیت رهاشده از هر نیروگاه (جدول ۲) بر این مدت‌زمان (۲۴۰ ساعت)، آهنگ گسیل برحسب Bq/h به‌دست آمد.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها نقش مهمی در پراکنش آن‌ها و حذف‌شان از مسیر آلودگی دارد. چند ویژگی اصلی ایزوتوپ‌های آلاینده-ی ید و سزیم در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول (۴): چند مشخصه‌ی مهم ایزوتوپ‌های پرتوزای رهاشده در

سوانح نیروگاهی [۴].

ایزوتوپ پرتوزا	قطر هواپویانه‌ی متوسط فعالیت (AMAD) [μm]	تندی نوعی نشست خشک (اصطکاکی) [cm/s]
<sup>131</sup> I	۰/۳۵	۰/۲۸
*Cs	۰/۴۷	۰/۲۱

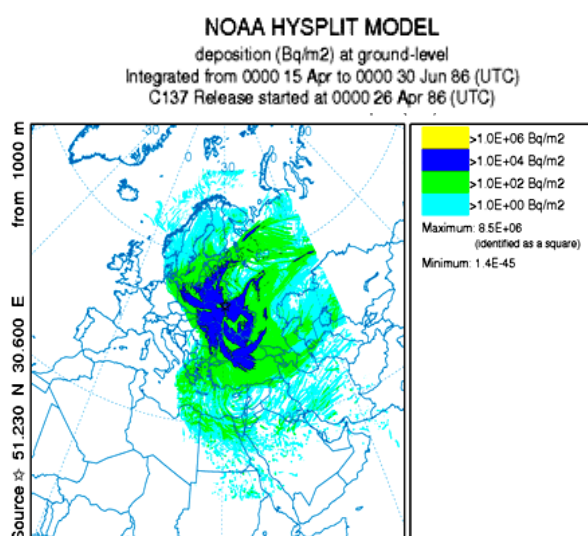
\* میانگین‌گیری شده برای ایزوتوپ‌های ۱۳۷ و ۱۳۴. & میانگین زمانی.

## ۲.۴. شبکه‌بندی ناحیه‌ی تحت بررسی

ناحیه‌ی تحت بررسی در شبیه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. مش‌بندی به‌صورت مربعی با ابعاد ۰/۵ درجه، که

## ۳.۴. بررسی صحت شبیه‌سازی

برای اطمینان از صحت روش به‌کارگرفته شده، پیش از شبیه‌سازی ناحیه‌ی مورد بررسی، حادثه‌ی چرنوبیل شبیه‌سازی و نتیجه آن با نتایج شبیه‌سازی پذیرفته شده‌ای دیگر مقایسه شد. شکل ۳ نتیجه‌ی این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی این نتایج با نتایج شبیه‌سازی دیگری که با استفاده از مدل DREAM انجام شده است [۴] صحت روش ما را تأیید کرد.



شکل (۳): شبیه‌سازی حادثه‌ی چرنوبیل. نتایج با آنچه که در مرجع [۴] آمده است هم‌خوانی دارد.

## ۴.۴. نتایج شبیه‌سازی

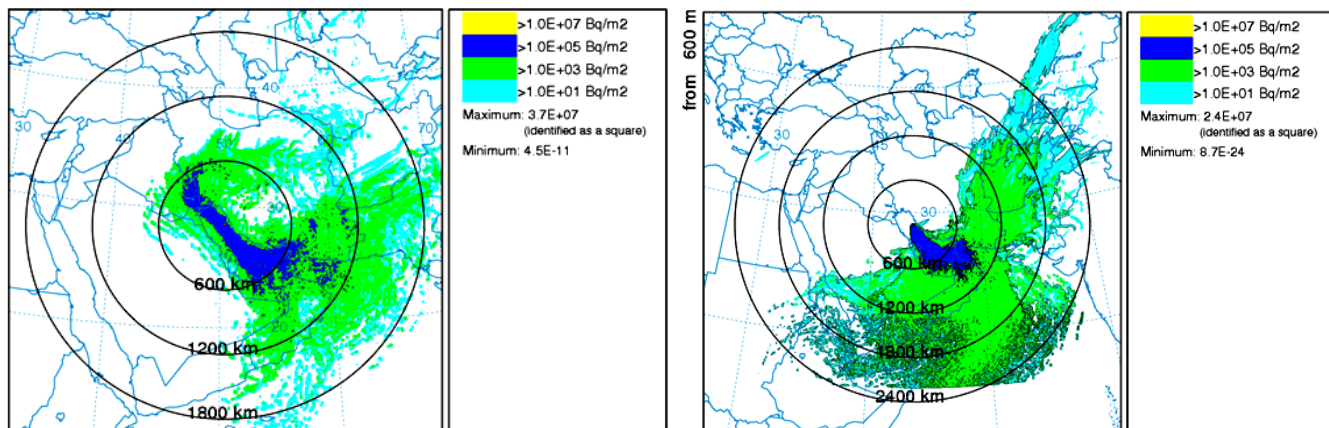
شبیه‌سازی با روش تشریح شده بیش از ۷۰۰ بار در شرایط مختلف جوی و برای نیروگاه‌های جدول ۱ انجام شد. داده‌های هواشناسی سال ۱۳۸۸ ه. (۲۰۰۹ م.) در این شبیه‌سازی‌ها به‌کار گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای نیروگاه بوشهر (جدول ۱، ردیف ۸) برای دو ماه مختلف از سال در شکل ۴ آمده است. مقایسه‌ی شکل‌های الف و ب و اب و ابستگي پراکندگی آلودگی به زمان وقوع سانحه را به‌خوبی نشان می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از این است که در صورت وقوع سانحه در نیروگاه بوشهر در اواخر زمستان و اوایل بهار، بیش‌ترین آلودگی به مناطق داخلی سرزمین ایران پراکنده می‌شود. یافتن اطلاعاتی از این دست برای هریک از نیروگاه‌های تحت بررسی با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده امکان‌پذیر است. شکل ۵ برخی دیگر از نتایج شبیه‌سازی‌ها را که برای نیروگاه‌های جدول ۱ انجام شده است نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود نیروگاه‌های بیرون از مرز ایران نیز، به‌مانند نیروگاه بوشهر، می‌توانند موجب آلودگی مناطقی از کشور ایران شوند.

بنابراین هر راه‌کاری که برای مقابله با حوادث نیروگاهی تدارک دیده می‌شود باید امکان وقوع سانحه در همگی این نیروگاه‌ها را به حساب آورد. در شکل ۶ تراکم آلودگی نواحی مختلف ایران در اثر وقوع سانحه در نیروگاه‌های داخلی را با نظیرش برای نیروگاه‌های خارجی مقایسه می‌کند.

همان‌طور که دیده می‌شود وقوع سانحه در نیروگاه‌های ارمنستان می‌تواند آلودگی‌ای از مرتبه‌ی  $10^7 \text{ Bq/m}^2$  در مناطق شمال‌غرب ایران ایجاد کند؛ درحالی‌که آلودگی ناشی از نیروگاه‌های پاکستان دست‌بالا از مرتبه‌ی  $10^3 \text{ Bq/m}^2$  می‌تواند باشد. وقوع سانحه در نیروگاه‌های داخلی نیز بیش‌تر نواحی جنوب و جنوب‌غرب ایران را تهدید می‌کند و تراکم آلودگی ناشی از آن از مرتبه‌ی  $10^6 \text{ Bq/m}^2$  می‌تواند باشد.

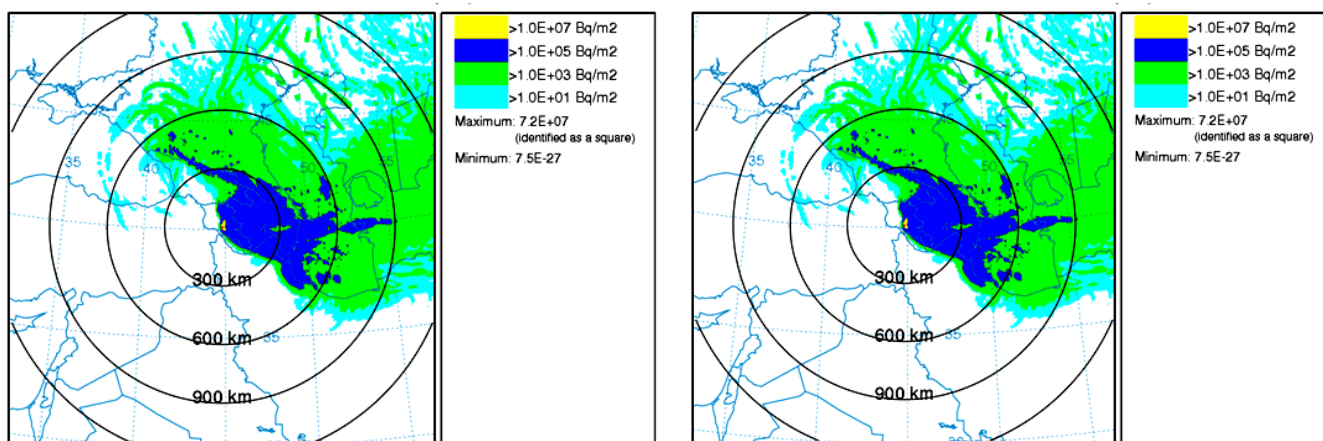
البته باید توجه داشت که میزان آسیب‌پذیری نواحی مختلف کشور علاوه بر فاصله از نیروگاه‌ها و زمان وقوع سانحه به پراکندگی جمعیت در این نواحی نیز بستگی دارد. جدا از انسان‌ها باید به اهمیت این نواحی از لحاظ زیرکشت بودن یا نبودن نیز توجه کرد.



(ب)

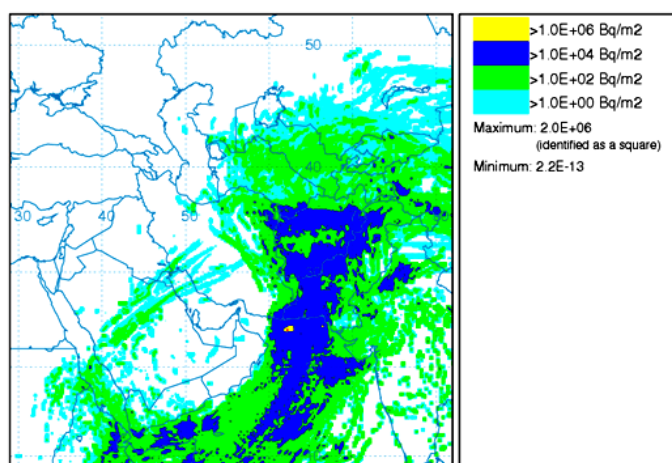
(الف)

شکل (۴): تراکم سطحی  $^{137}\text{Cs}$  ناشی از یک سانحه‌ی نوعی در نیروگاه بوشهر در شرایطی مشابه با (الف) تاریخ ۱۰ تا ۲۶ دی ۱۳۸۱ هـ. (2009: 31 Dec) تا (ب) تاریخ ۹ آذر تا ۱۰ دی ۱۳۸۱ هـ. (2009: 30 Nov- 31 Dec) (- 15 jan).



(ب)

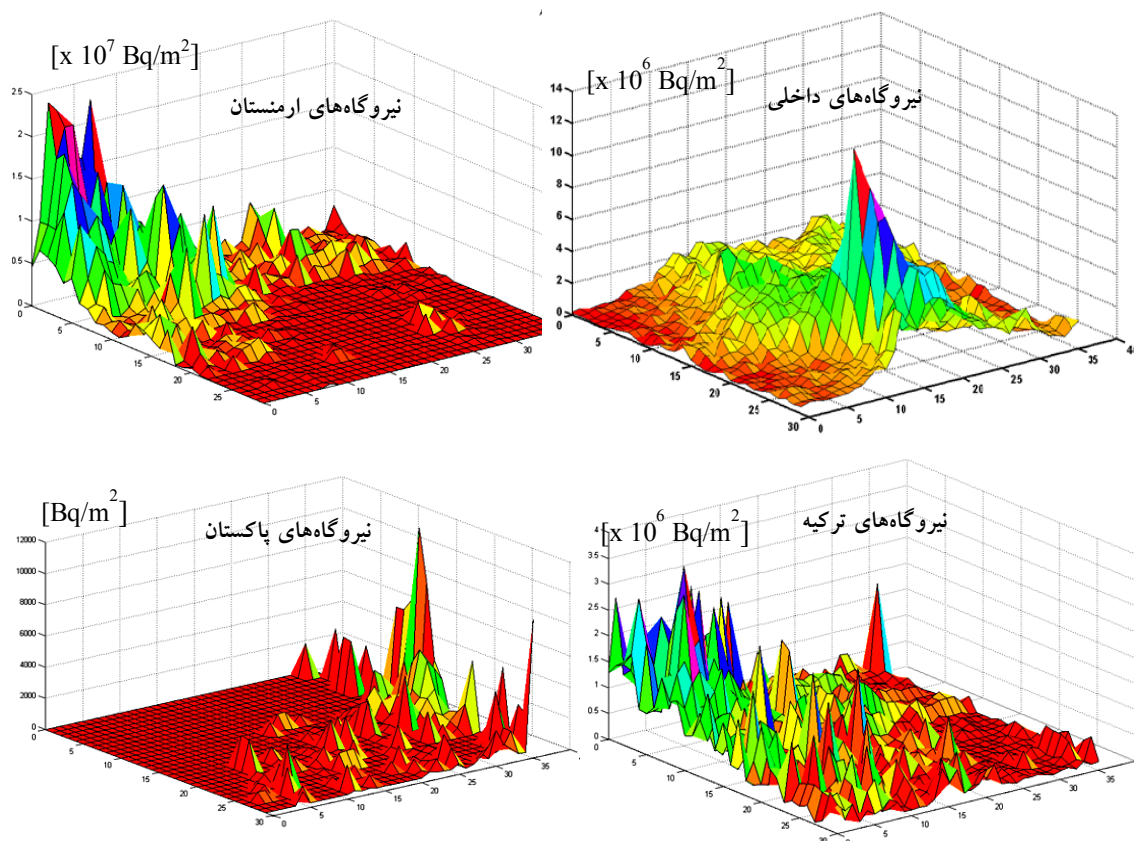
(الف)



(ج)

شکل (۵): تراکم سطحی  $^{137}\text{Cs}$  ناشی از یک سانحه‌ی نوعی در چند نیروگاه الف. نیروگاه‌های ارمنستان، ب. نیروگاه‌های ترکیه و ج. نیروگاه‌های پاکستان جدول ۱ در شرایطی مشابه با دی ۱۳۸۱ هـ. (ژانویه ۲۰۰۹ م).





شکل (۶): میانگین تراکم مواد پرتوزای ناشی از وقوع سانحه در نیروگاه‌های داخلی و خارجی برحسب  $Bq/m^2$ .

## ۵. نتیجه‌گیری

در اثر وقوع سوانح هسته‌ای سطح بالا در یک نیروگاه هسته‌ای، مواد پرتوزای مختلفی می‌تواند در جو پراکنده شود. از این میان بعضی ایزوتوپ‌های پرتوزای ید و سزیم به دلیل قابلیت پراکنش بیش‌ترشان بیش از مواد دیگر اهمیت دارند. چگونگی توزیع این مواد به شرایط جوی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بستگی دارد. این مواد ممکن است تا صدها و حتی هزارها کیلومتر دورتر از محل سانحه پراکنده شوند؛ از این رو، پیش‌بینی پراکنش مواد پرتوزای حاصل از سوانح هسته‌ای در نیروگاه‌های به‌ظاهر دوردست نیز اهمیت دارد.

در این مقاله، نتایج پژوهشی ارائه شد که در آن با استفاده از یک مدل HYSPLIT، اثرپذیری مناطق داخلی کشور ایران در صورت وقوع سانحه در یکی از نیروگاه‌های پیرامونی آن

بررسی شده است. بعضی از نتایج این تحقیق از این قرار هستند:

- توزیع آلودگی خروجی از یک نیروگاه به شرایط جوی، و بدین‌سان به زمان بررسی این پدیده بستگی دارد. به‌نظر می‌رسد، برپایی ایستگاه‌هایی که بتواند با توجه به پیش‌بینی‌های هواشناسی، وضعیت پراکنش آلودگی‌ها در صورت وقوع سانحه در نیروگاه‌های پیرامونی ایران را تخمین بزند ضروری باشد.

- همه‌ی نیروگاه‌های واقع در ۲۰ تا ۵۰ درجه‌ی عرض شمالی (N) و ۲۵ تا ۷۵ درجه‌ی طول شرقی (E) می‌توانند موجب آلودگی هسته‌ای سرزمین ایران شوند. به این ترتیب، برقراری کانال‌های ارتباطی برای تبادل اطلاعات و اخبار درباره‌ی این

نتایج این پژوهش انجام شود. مکان این ایستگاه‌ها علاوه بر توزیع مکانی آلودگی‌های محتمل به عواملی دیگر از جمله پراکندگی جمعیت و اهمیت نواحی مختلف از دیدگاه زراعی و دامی بستگی دارد. از این رو، در این باره نیز مطالعاتی انجام شده است که نتایج آن در جایی دیگر گزارش خواهد شد.

نیروگاه‌ها بین کشورهای ذینفع، به ویژه ارمنستان، می‌تواند اقدام پیش‌گیرانه‌ی مفیدی به حساب آید.

– راه‌اندازی یک سامانه‌ی پایش محیطی برای تشخیص افزایش آلودگی‌های هسته‌ای (سامانه‌ی هشدار آنی) از ضروریات هر کشوری از جمله ایران به نظر می‌رسد. جایابی ایستگاه‌های اندازه‌گیری چنین سامانه‌ای، می‌تواند با توجه به

## ۶. مراجع

- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۷).
- [۹] فیضی نژاد، مسعود و خاموشی، سیروس. مدل‌سازی پخش جوی در نیروگاه هسته‌ای بوشهر. مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای، ۱(۳۱) (۱۳۸۳) ۴۲-۳۵.
- [۱۰] معماریان، محمد حسین. کاویانی، فرشته. و اسلامی کلانتری، محمد. شبیه‌سازی انتقال، پخش جوی، و نهشت آلاینده‌های هسته‌ای ره‌اشده از یک حادثه‌ی فرضی در نیروگاه بوشهر؛ مجله‌ی فیزیک زمین و فضا، ۳(۴۳) (۱۳۹۶) ۶۵۰ - ۶۳۵.
- [11] D.G. Cacuci. Handbook of nuclear engineering, Springer, (2010), Ch. 6.
- [۱۲] ه. سمبر و ت. جانسون، مقدمه‌ای بر فیزیک بهداشت. ویرایش چهارم، (۱۳۹۵)، انتشارات شهراب، تهران - ایران، فصل ۱۲، (ترجمه‌ی ایوب بنوشی).
- [13] New Zealand ministry for the environment, Good practice guide for atmospheric dispersion modelling, Wellington, N.Z. ministry for the Environment, (2004).
- [14] S.T. Hanna, G.A. Briggs and R.P. Hosker. Handbook on atmospheric diffusion models and methods, U.S. Dept. of Energy, Washington D.C, (1982).
- [15] HYSPLIT summery handout, Air resources laboratory, available at <https://www.arl.noaa.gov/> (11/28/2017).
- [16] D.B. Turner. Workbook of atmospheric dispersion estimates: An introduction to dispersion modeling, 2<sup>nd</sup> ed., Lewis publishers, (1994).
- [1] P.Y. Lipsy, K.E. Kushida and T. Incerti. The Fukushima disaster and Japan's nuclear Plant vulnerability in comparative perspective. Environ. Sci. Technol., 47 (2013) 6082-6088.
- [2] ICRIN Project 2011. International Chernobyl Portal [chernobyl.info](http://chernobyl.info). Retrieved (2011).
- [3] Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Vienna: International Atomic Energy Agency. (2006).
- [4] J. Brandt, J.H. Christensen and L.M. Frohn. Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model. Atmos. Chem. Phys., 2 (2002) 397-417.
- [5] Y.A. Izrael. Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents. Elsevier Science Ltd (2002).
- [6] H.Y. An, Y. Kang, S. Song and Y. Kim. Atmospheric dispersion characteristics of radioactive materials according to the local weather and emission conditions, J. Radiat. Prot. Res. 41(4) (2016) 315-327.
- [۷] روستازاده شیخ یوسفی، پرستو. بررسی پخش مواد رادیواکتیو از یک راکتور هسته‌ای فرضی ۵ MW در شرایط بهره‌برداری عادی و بعد از وقوع یک حادثه در سطح شهر تهران. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، (۱۳۹۲).
- [۸] پرسوزی آزاد شریبانی، زینب. ارزیابی دز دریافتی ساکنان اطراف نیروگاه در زمان عمل‌کرد عادی نیروگاه اتمی بوشهر. پایان‌نامه‌ی