

شبیه‌سازی پاشش جوئی و ارزیابی دُز با کاربست مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای نیروگاه بوشهر

مسعود فیضی‌نژاد^۱، حسین ملکوتی^۲، مسعود صدری‌نسب^۳، سرمد قادر^۴، و دانیال یازجی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

^۲ استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۵ دانشجوی دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۳۱)

چکیده

شبیه‌سازی و پیش‌بینی نحوه پاشش (Dispersion) جوی مواد ناشی از ورود آلاینده‌ها به جو (مانند مواد خروجی از دودکش کارخانه‌های صنعتی و نیروگاه‌ها) دارای اهمیت بسیاری از دیدگاه‌های متفاوت از جمله پایش محیطی بلندمدت و محاسبات پرتوگیری (Dose Calculation) و نیز صدور هشدار مناسب در صورت بروز حادثه می‌باشد. یکی از راه‌های رسیدن به این هدف استفاده از یک سامانه جفت‌شده هواشناسی-پاشش می‌باشد. در واقع در سامانه مذکور یک مدل هواشناسی با یک مدل پاشش جوی جفت می‌شود. لذا هر چه دقت و قابلیت اعتماد خروجی مدل هواشناسی بیشتر باشد عملکرد سامانه جفت‌شده نیز بهبود خواهد داشت. در کار حاضر ابتدا عملکرد مدل WRF با ترکیب‌های مختلف طرحواره‌های پارامترسازی فیزیکی (خردفیزیک ابر، تابش طول موج بلند، تابش طول موج کوتاه، لایه سطحی، سطح زمین، لایه مرزی و همرفت کومه‌ای) برای پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی منطقه‌ی مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، تعداد ۸ پیکربندی از دیدگاه پارامترسازی‌های فیزیکی مختلف انتخاب و پس از اجرای مدل WRF برای تعدادی تاریخ منتخب و انجام حساسیت‌سنجی و اعتبارسنجی نتایج خروجی مدل، پیکربندی مناسب انتخاب شد. ارزیابی عملکرد پیش‌بینی‌های مدل هواشناسی WRF به‌وسیله محاسبه پارامترهای آماری از جمله ضریب همبستگی (CC) و جذر میانگین مربعات (RMSE) و مقایسه با داده‌های مشاهدات گردآوری شده (برج هواشناسی و سودار نیروگاه و داده‌های ایستگاه‌های همدیدی در اطراف آن) در تاریخ‌های منتخب انجام گردید.

بعد از تعیین پیکربندی مناسب برای مدل WRF، شبیه‌سازی پاشش و پیش‌بینی دُز مؤثر سالانه گروه سنی بزرگ‌سال با استفاده از مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای کارکرد عادی نیروگاه بوشهر انجام شد. برای این منظور پیش‌بینی‌های مدل WRF با استفاده از پیکربندی منتخب، به‌عنوان ورودی هواشناسی مدل پاشش به‌کار رفت و سپس شبیه‌سازی‌های پاشش و محاسبات دُز با مدل پاشش HYSPLIT انجام گردید. پیش‌بینی دُز معادل مؤثر سالانه توسط این مدل جفت‌شده برای سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی به ترتیب $5/8 \times 10^{-8}$ Sv/y، $6/7 \times 10^{-8}$ Sv/y و $1/1 \times 10^{-7}$ Sv/y را به دست داد، در مقابل مقدار $7/7 \times 10^{-8}$ Sv/y برای گزارش FSAR نیروگاه، نشان‌دهنده‌ی صحت پیش‌بینی‌های دُز معادل توسط مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج پیش‌بینی دُز با حد دُز سالانه کارکرد عادی نیروگاه، مقداری کمتر از ۰/۲ درصد ($< 0/2\%$) را به دست داد، که نشان می‌دهد پرتوگیری سالانه مردم برای کارکرد عادی نیروگاه نسبت به حد دُز قانونی اعلام شده بسیار ناچیز است.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT با تقریب بسیار مناسبی می‌تواند برای پیش‌بینی پاشش و محاسبات دُز نیروگاه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج این مدل جفت‌شده می‌تواند در تأمین اطلاعات مورد نیاز مدیریت شرایط اضطراری برای پیش‌بینی حرکت پلوم رادیواکتیو و محاسبات پرتوگیری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، WRF، پارامترسازی، HYSPLIT، محاسبات دُز، نیروگاه بوشهر

۱ مقدمه

مدل‌های پاشش جوئی در نیروگاه‌ها برای مطالعه پراکندگی نشر عناصر رادیواکتیو در طول شرایط کارکرد عادی و حادثه‌ای استفاده می‌شوند (سرینیواس و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور کلی مشاهدات هواشناسی محدوده نیروگاه به‌عنوان داده‌های ورودی مدل پخش و ترابرد استفاده می‌شود. خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا مانند WRF (Weather Research and Forecasting) به‌عنوان ورودی هواشناسی مدل پاشندگی و برای پیش‌بینی نشر آلاینده و یا تغییرات مکانی پارامترهای هواشناسی در تخمین پاشندگی استفاده می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۱۲). این مدل‌ها میدان متغیرهای هواشناسی از جمله جریان باد را با حل عددی معادلات بسپط حرکت در اختیار قرار می‌دهند.

با این حال، تفکیک مکانی این مدل‌ها برای حل دقیق فرآیندهای فیزیکی مانند تلاطم، همرفت کومه‌ای، انتقال و غیره بیش‌ازحد درشت است و از این‌رو این فرآیندها پارامترسازی می‌شوند؛ بنابراین طرحواره‌های پارامترسازی یک جزء ذاتی تمام مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا هستند. یک مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا (مانند WRF) شامل طرحواره‌های پارامترسازی تابش، شار لایه سطحی، تلاطم، همرفت کومه‌ای، ابر و غیره است. به‌طور کلی شش تا هفت طرحواره برای نمایش هر یک از این فرآیندها وجود دارد و هر یک محاسن و معایب خود را دارد.

چندین مطالعه در گذشته برای حساسیت‌سنجی نتایج مدل و انتخاب طرحواره‌های پارامترسازی در مناطق مختلف جغرافیایی و آب‌وهوایی جهان انجام شده است. شریواستاوا و همکاران (۲۰۱۵)، حساسیت طرحواره‌های پارامترسازی لایه مرزی (PBL)، لایه سطحی (SL) و سطح زمین (LSM) در مدل WRF برای منطقه نیروگاه کایگا هند را بررسی کردند. آنها چندین ترکیب مختلف طرحواره‌های لایه مرزی، لایه سطحی و مدل سطح زمین

برای بررسی باد سطحی، دما و رطوبت در منطقه مورد مطالعه به‌کار بردند. ژانگ و ژانگ (۲۰۰۴) اثر پنج طرحواره لایه مرزی (PBL) مدل MM5 برای میدان باد، دمای سطح و لایه مرزی در ایالات متحده آمریکا و مقایسه با مشاهدات سطح و جوّ بالا بررسی نمودند.

بورگه و همکاران (۲۰۰۸) تجزیه و تحلیل جامعی از حساسیت مدل WRF برای برنامه کیفیت هوا در شبه‌جزیره ایبری انجام دادند. ایوانز و همکاران (۲۰۱۱) اجرای همادی WRF با یک گروه فیزیک ۳۶ عضوی را بر روی جنوب شرق استرالیا مورد بررسی قرار دادند.

مطالعات فراوانی در منطقه ایران برای اعتبارسنجی و پارامترسازی‌های مختلف مدل‌های پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس از قبیل WRF انجام شده است که در اینجا به برخی از آنها اشاره می‌شود. قادر و همکاران (۱۳۹۴) ارزیابی پارامترسازی فیزیکی پیش‌بینی میدان باد سطحی برای منطقه خلیج فارس را انجام دادند. آنها یک سامانه همادی با ۱۵ عضو برای پیش‌بینی میدان باد سطحی محدوده خلیج فارس در اجرای مدل WRF را اجرا و نتایج آن را بررسی کردند. ملکوتی و علی‌محمدی (۱۳۹۳) حساسیت‌سنجی مدل WRF به پارامترسازی مختلف برای توفان گونو را بررسی کردند. همچنین لایقی و همکاران (۱۳۹۶) حساسیت پیش‌بینی‌های مدل WRF به پارامترسازی فیزیکی در زمان مونسون تابستانی محدوده خلیج فارس و دریای عمان را انجام دادند. قصابی و همکاران (۱۳۹۳) نیز عملکرد طرحواره‌های پارامترسازی مدل WRF در برآورد بارش‌های جنوب غرب ایران را بررسی نمودند.

نتیجه مشترک تمامی این مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب طرحواره برای یک شبیه‌سازی مناسب، وابسته به هدف و کاربرد مدل و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر می‌باشد. از این‌رو مطالعات حساسیت نیازمند تمرکز بر روی ترکیب مناسب طرحواره‌ها برای یک منطقه خاص

می‌باشد. پیروزمند و همکاران (۲۰۱۵)، ارزیابی دز فردی و جمعی نیروگاه برای شرایط عادی و حادثه‌ای را بررسی کردند. زالی و همکاران (۲۰۱۷)، مدل پاشش HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) را برای محاسبه دُز معادل مؤثر فردی و جمعی کارکرد عادی نیروگاه بوشهر به کار بردند.

نتیجه کارهای انجام شده در مورد محدوده کاربرد، اعتبارسنجی، صحت و حساسیت‌سنجی مدل گوسی نشان می‌دهد که این مدل در مقیاس محلی می‌تواند جهت محاسبات پاشش بلندمدت (Long Term) استفاده شود. با افزایش فاصله از چشمه با توجه به تقریب میدان باد ثابت در فرضیات این مدل در هنگام استفاده از مدل گوسی می‌بایست احتیاط نمود. در این مورد مدل‌های پاشش میان‌مقیاس شبه‌سازی‌های معتبرتری را ارائه می‌دهند. کار حاضر تلاش جهت توسعه شبه‌سازی‌های پاشش در فواصل میان‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس بدون فرضیات مدل گوسی و با استفاده از یک مدل لاگرانژی پخش و انتشار جوئی است. این کار با ایجاد سامانه جفت‌شده هواشناسی-پاشش صورت می‌گیرد که در ادامه تشریح می‌شود. برای این کار مدل HYSPLIT که یکی از مدل‌های پرکاربرد و معتبر در زمینه کار مقاله حاضر می‌باشد، در نظر گرفته شده است. بررسی مدل HYSPLIT و چگونگی توسعه آن توسط دراکسلر و هس (۲۰۰۴) تشریح شده است.

در کار حاضر مدل هواشناسی میان‌مقیاس (WRF) با مدل پاشش جوئی (HYSPLIT) جفت می‌شود و به کمک آن پیش‌بینی‌های پاشندگی و در ادامه محاسبات پرتوگیری ناشی از کارکرد عادی نیروگاه بوشهر ارزیابی می‌شود. چنین سامانه جفت شده‌ای برای نشان دادن توزیع الگوی پرتوگیری در اطراف نیروگاه برای شرایط کار عادی آن و همچنین به صورت یک ابزار تصمیم‌سازی برای مقابله با شرایط اضطراری نیروگاه می‌تواند بسیار

مدل‌سازی پخش و انتشار هواشناسی در کارهای ساتون (۱۹۴۷) با معرفی مدل گوسی آغاز شد، بسط و توسعه آن به شکل کنونی بر اساس کارهای پاسکویل (۱۹۷۱)، پاسکویل و اسمیت (۱۹۸۳) صورت گرفت. در مدارک و استانداردهای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (International Atomic Energy Agency) (۱۹۸۰) و (۲۰۰۱)، مدل گوسی پاشش معرفی شده که دلیل آن سادگی ورودی‌های مورد نیاز (حداقل داده‌ها: سرعت باد و مقدار رهاسازی چشمه آلودگی) در مقایسه با مدل‌های عددی می‌باشد (شنل و دی، ۱۹۹۹). به‌رحال این مدل‌ها با برخی ساده‌سازی‌ها برای فواصل کوتاه از چشمه آلودگی (Short Range) مانند فرض شرایط پایا، میدان باد همگن، سطح هموار، برش باد صفر و غیره کاربرد دارد (شنل و دی، ۱۹۹۹؛ جعفری و همکاران، ۱۳۸۶). مطالعات ارزیابی، صحت و حساسیت مدل گوسی به پارامترهای ورودی در کارهای واکولین و لوی (۲۰۰۰)، میلر و کریگ (۱۹۸۶) و کاراسکال و همکاران (۱۹۹۳) تشریح شده است.

چندین مطالعه در گذشته برای ارزیابی پاشش جوئی و محاسبات پرتوگیری (Dose Calculation) نیروگاه بوشهر (Bushehr Nuclear Power Plant) انجام شده است. فیضی‌نژاد و خاموشی (۱۳۸۳)، کد کامپیوتری را بر اساس مدل گوسی پخش برای ارزیابی پاشندگی شرایط کارکرد عادی نیروگاه بوشهر توسعه دادند. ملکوتی و فیضی‌نژاد (۱۳۸۳)، مدل‌سازی انتشار بلندمدت رهاسازی رادیونوکلیدها برای نیروگاه بوشهر را ارزیابی نمودند. رئیس‌علی و همکاران (۲۰۰۶)، دُز معادل مؤثر فردی و جمعی را با استفاده از روابط مدل گوسی برای شرایط حادثه‌ای نیروگاه ارزیابی کردند. سهرابی و همکاران (۲۰۱۳)، محاسبات پرتوگیری فردی و جمعی برای شرایط کارکرد عادی و حادثه‌ای نیروگاه را انجام دادند. همچنین

۲ داده‌ها و روش کار

مدل WRF یک مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هواسست که برای هر دو کاربردهای تحقیقاتی و عملیاتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و می‌تواند برای شبیه‌سازی در مقیاس‌های مختلف از چند کیلومتر تا صدها کیلومتر به کار رود. اطلاعات بیشتر توسط ونگ و همکاران (۲۰۱۰) و اسکاماروک و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است.

مدل WRF از جمله مدل‌هایی است که از خروجی‌های آن به‌عنوان ورودی هواسشناسی مورد نیاز مدل‌های پاشش برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های منتشر شده از یک چشمه استفاده می‌شود. ویژگی مهم این مطلب این است که با جفت‌کردن این مدل با یک مدل پاشش می‌توان شبیه‌سازی را برای انواع سناریوها انجام داد.

به‌کارگیری طرحواره‌های متفاوت برای انجام پارامترسازی‌های فیزیکی در مدل‌های میان‌مقیاس و از جمله مدل WRF یکی از بخش‌های مرتبط با عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌های عددی میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا می‌باشند. پارامترسازی‌های فیزیکی موجود در مدل WRF مواردی همچون میکروفیزیک، تابش موج بلند، تابش موج کوتاه، لایه سطحی، سطح زمین، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت کومه‌ای را شامل می‌شوند. در کار حاضر تلاش شده تا مجموعه‌ای مناسب از ترکیب پارامترسازی‌های فیزیکی برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شود.

همان‌طور که ذکر شد، برای طرحواره‌های فیزیکی متفاوت در مدل WRF انتخاب‌های متعددی وجود دارد که به برخی از آنها اشاره می‌شود. برای پارامترسازی خردفیزیک، طرحواره‌های Lin، WSM6، WSM3، Ferrire از جمله طرحواره‌های پرکاربرد هستند. برای پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای نیز دو طرحواره YSU و

حائز اهمیت باشد.

بخش اول مطالعه حاضر شامل پیدا کردن پیکربندی مناسب مدل WRF از دیدگاه پارامترسازی‌های فیزیکی، برای پیش‌بینی میدان باد به‌عنوان ورودی هواسشناسی مدل پاشش نیروگاه بوشهر می‌باشد، برای این کار از ۸ ترکیب مختلف طرحواره‌های پارامترسازی برای مدل WRF استفاده شد.

بخش دوم شامل اعتبارسنجی مدل لاگرانژی HYSPLIT با استفاده از داده‌های بلندمدت ایستگاه هواسشناسی نیروگاه می‌باشد. بعد از انجام اعتبارسنجی مدل HYSPLIT، این مدل به‌صورت جفت‌شده با مدل WRF، برای ارزیابی پاشش و محاسبات دُز نیروگاه بوشهر برای شرایط کارکرد عادی آن استفاده می‌شود و نتایج حاصل با مقادیر گزارش‌های تحلیل ایمنی و محیطی نیروگاه مقایسه می‌شود.

نیروگاه بوشهر از نظر تقسیمات کشوری در بخش حومه شهرستان بوشهر در استان بوشهر واقع است. سایت نیروگاه تقریباً در ۱۸ کیلومتری بندر بوشهر مرکز استان بوشهر، در جهت جنوب شرقی آن قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت نیروگاه بوشهر در محدوده خلیج فارس.

۲-۱ نحوه ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌های مدل

WRF

برای یافتن پیکربندی مناسب مدل WRF نیاز است تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های این مدل با داده‌های مشاهدات (ماهواره و ایستگاه همدیدی) مورد ارزیابی قرار گیرند. برای انجام ارزیابی‌ها نیاز است تا از پارامترها و سنجه‌های آماری مانند اریبی (Bias)، جذر میانگین مربعات RMSE (Root Mean Square Error)، ضریب همبستگی CC (Correlation Coefficient) و غیره استفاده نمود. با توجه به اینکه هدف کار حاضر یافتن پیکربندی مناسب مدل WRF می‌باشد لذا باید از سنجه‌هایی استفاده نمود که میزان خطای خروجی‌های مدل را در مقایسه با مشاهدات و همچنین میزان انطباق آنها را با مشاهدات مشخص نمایند؛ بنابراین از این دیدگاه پارامترهایی همچون جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی دارای اهمیت فراوانی هستند. لذا در کار حاضر برای یافتن پیکربندی مناسب مدل، از دو پارامتر آماری مهم جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی استفاده شده است.

MYJ و طرحواره‌های کین فریج، بتس-میلر-جانیک (BMJ) و گرل-دونجی نیز برای پارامترسازی همرفت کومه‌ای و برای سطح زمین نیز دو طرحواره Noah LSM و MM5 5-layer LSM بیشترین استفاده را دارند. برای لایه سطحی طرحواره‌های MM5 similarity و Eta و similarity و برای تابش موج بلند طرحواره‌های RRTM و GFDL و برای تابش موج کوتاه نیز می‌توان به طرحواره‌های Dudhia و GFDL اشاره نمود.

حال می‌بایست از میان تعداد بسیار زیاد حالت‌های متفاوتی که از ترکیب پیکربندی‌های فیزیکی مدل حاصل می‌شوند، تعدادی پیکربندی را انتخاب نمود. در کار حاضر از ۸ پیکربندی متفاوت استفاده شده است که انتخاب آنها با توجه به کارهای تحقیقاتی انجام شده صورت گرفته است (از جمله کارهای انجام شده توسط زو و همکاران، ۲۰۱۱؛ اونیل و همکاران، ۲۰۱۰؛ دوویویه و کاسانو، ۲۰۱۳؛ قادر و همکاران، ۱۳۹۴؛ پرلین و همکاران، ۲۰۱۴). جدول ۱ مشخصات مربوط به ۸ پیکربندی متفاوت مورد استفاده در کار حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات ۸ پیکربندی متفاوت مدل WRF مورد استفاده در کار حاضر.

شماره پیکربندی	عنوان اختصاری	خرد فیزیک	تابش موج بلند	تابش موج کوتاه	لایه سطحی	سطح زمین	لایه مرزی سیاره‌ای	همرفت کومه‌ای
۱	Phys01	Lin	RRTM	Goddard	Pleim-Xiu	Pleim-Xiu	ACM2	Kain-ritsch
۲	Phys02	Lin	RRTM	Goddard	Revised MM5	Noah	MRF	Kain-ritsch
۳	Phys03	Lin	RRTM	Goddard	Eta	Noah	MYJ	Kain-ritsch
۴	Phys04	Lin	RRTM	Goddard	MYNN	Noah	MYNN2	Kain-ritsch
۵	Phys05	Lin	RRTM	Goddard	QNSE	Noah	QNSE PBL	Kain-ritsch
۶	Phys06	Thompson	RRTM	Dudhia	MM5	5 layer LSM	YSU	Grell
۷	Phys07	Goddard GCE	RRTM	RRTM	Eta	Noah	MYJ	Grell Deveney
۸	Phys08	Ferrier	RRTM	Dudhia	MM5	Noah	YSU	BMJ

۴۹° ۲۸ شمالی می‌باشد. با توجه به هدف کار حاضر، برای انجام پیش‌بینی‌های مدل WRF از یک حوزه محاسباتی که از سه شبکه تو در تو (لانه‌ای) با گام شبکه‌ای ۲۷ km، ۹ km و ۳ km در راستای افقی (طول و عرض جغرافیایی) تشکیل شده، استفاده می‌شود. شکل ۲ نمایی از حوزه محاسباتی را نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه محاسباتی با تفکیک افقی ۲۷ km با خط مشکی، ناحیه محاسباتی با تفکیک افقی ۹ km با خط سفید رنگ و ناحیه محاسباتی با تفکیک افقی ۳ km با خط قرمز رنگ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی از حوزه محاسباتی کار حاضر برای مدل WRF.

شبیه‌سازی‌های اعتبارسنجی و حساسیت‌سنجی مدل WRF بر اساس دو گروه داده انجام شده است. گروه اول داده‌های مشاهدات و گروه دوم داده‌های مورد نیاز برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل WRF هستند. گروه نخست داده‌ها، داده‌های مشاهداتی مانند میدان‌های باد، دما و فشار سطح می‌باشند که به کمک آنها می‌توان اعتبارسنجی خروجی مدل WRF را انجام داد. این داده‌ها شامل داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های همدیدی (سینوپتیک) اطراف نیروگاه جهت تدقیق میدان باد منطقه نیروگاه برای دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی و همچنین داده‌های اندازه‌گیری توسط دکل هواشناسی ۱۰۰ متری و سیستم سودار نیروگاه به ترتیب

جزئیات مربوط به روابط آماری توسط ویلکس (۲۰۱۱) تشریح شده است. پارامتر جذر میانگین مربعات خطا از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن e خطا یا همان اختلاف میان داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده می‌باشد.

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}, \quad (1)$$

که O و P به ترتیب، مقادیر داده‌های پیش‌بینی و داده‌های مشاهدات می‌باشند.

عدد بی‌بعد ضریب همبستگی شاخصی است که به منظور تعیین نوع همبستگی بین دو متغیر به کار می‌رود و مقدار آن بین یک و منفی یک متغیر است. در رابطه زیر ضریب همبستگی ارائه شده است.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(r_i - \bar{r})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 (r_i - \bar{r})^2}}, \quad (2)$$

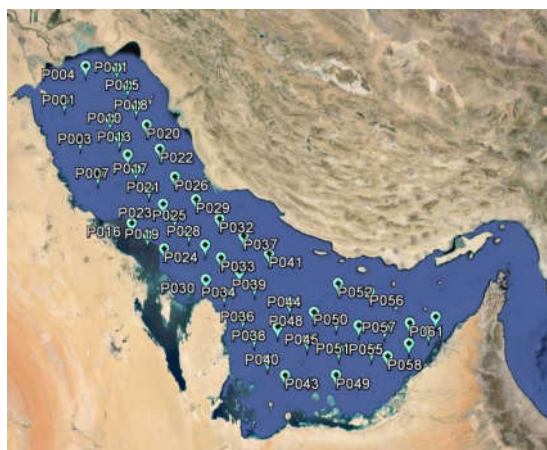
که r معرف داده‌های مرجع (مشاهدات) و p معرف داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشد. به علاوه \bar{r} و \bar{p} نیز بیان‌کننده میانگین داده‌های مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده می‌باشند.

تعیین حداقل مقدار ضریب همبستگی و همچنین جذر میانگین مربعات خطا برای کاربردهای عملی هواشناسی کار پیچیده و دشواری است. با کنکاش در کارهای تحقیقاتی انجام‌شده از جمله توسط رید و ترنر (۲۰۰۱) و تام (۱۹۶۶) ضریب همبستگی با مقداری در حدود ۰/۵ را حداقل مورد نیاز برای کاربردهای عملیاتی می‌توان در نظر گرفت.

۲-۲ انجام حساسیت‌سنجی و اعتبارسنجی

شبیه‌سازی‌های مدل WRF

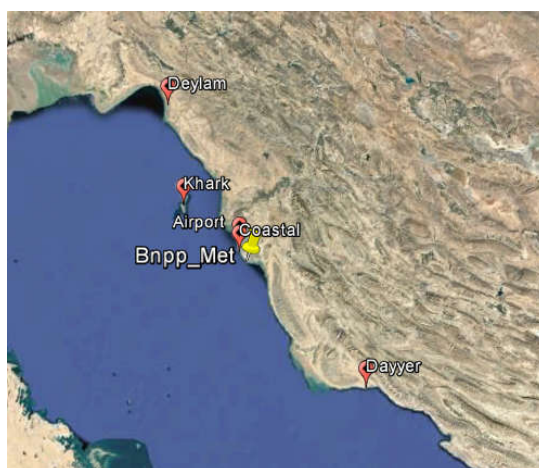
دامنه مورد مطالعه، منطقه خلیج فارس در جنوب ایران با مرکزیت نیروگاه بوشهر، "۰۸' ۵۳' ۵۰° شرقی و "۴۷' ۴۷' ۰۸°



شکل ۴. موقعیت مکانی نقاطی که داده‌های ثبت‌شده توسط ماهواره در آنها برای اعتبارسنجی نتایج مدل WRF مورد استفاده قرار گرفته است.

برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ میلادی و ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ و دو فصل زمستان و بهار سال ۲۰۱۶ میلادی می‌باشد. جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف نیروگاه و شکل ۳ موقعیت آنها را ارائه می‌کند. علاوه بر این داده‌های مشاهده‌ای، کار ارزیابی برای تعداد قابل توجهی از نقاط مربوط به اندازه‌گیری‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای نیز انجام شده است. برای این منظور داده‌های اندازه‌گیری دو سنجنده ماهواره‌ای QuikSCAT و ASCAT برای نقاطی که در شکل ۴ مشخص شده مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مربوط به کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس از طریق وبگاه دانشگاه وایومینگ دریافت شده‌اند.

به‌عنوان روش انتخاب چندین تاریخ برای اجرای مدل WRF در حساسیت‌سنجی آن برای منطقه نیروگاه بوشهر، موارد وقوع حداکثر و حداقل سالانه دما و سرعت باد برای ایستگاه‌های مشخص شده در جدول ۲ مد نظر قرار گرفت. مقادیر حدی به این دلیل که آنها به احتمال زیاد تأثیر قابل توجهی در پراکندگی جوئی آلاینده‌ها و علاوه بر آن، تقریباً در کل سال پراکنده هستند انتخاب شدند. تاریخ‌های منتخب برای اجرای حساسیت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل WRF و تعیین پارامترهای آماری برای گزینش پیکربندی مناسب‌تر بین ۸ پیکربندی منتخب در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هواشناسی نیروگاه که برای اعتبارسنجی نتایج مدل WRF برای منطقه نیروگاه استفاده شدند.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌هایی که داده‌های مشاهدات آنها برای اعتبارسنجی و حساسیت‌سنجی نتایج مدل WRF مورد استفاده قرار گرفته است.

ردیف	اسم ایستگاه	عنوان اختصاری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دوره
۱	بوشهر ساحلی	Coastal	۵۰/۸۳۰۰	۲۸/۹۸۰۰	۲۰۰۵-۲۰۱۵
۲	فرودگاه بوشهر	Airport	۵۰/۸۱۹۲	۲۸/۹۶۳۱	۲۰۰۵-۲۰۱۵
۳	همدیدی بندر دیلم	Deylam	۵۰/۱۶۶۷	۳۰/۰۵۰۳	۲۰۰۵-۲۰۱۵
۴	همدیدی بندر دیر	Dayyer	۵۰/۹۳۳۳	۲۷/۸۳۳۳	۲۰۰۵-۲۰۱۵
۵	همدیدی جزیره خارک	Khark	۵۰/۳۱۵۳	۲۹/۲۶۵۶	۲۰۰۵-۲۰۱۵
۶	هواشناسی نیروگاه بوشهر	Bnpp_Met	۵۰/۸۸۳۱	۲۸/۸۲۵۳	۲۰۰۰-۲۰۱۰

جدول ۳. تاریخ‌های منتخب برای اجرای حساسیت‌سنجی مدل WRF.

ردیف	روز، ماه، سال	ردیف	روز، ماه، سال
۱	۱۹۹۹-۱۱-۰۱	۸	۲۰۱۲-۰۱-۲۲
۲	۲۰۰۱-۰۵-۲۸	۹	۲۰۱۳-۱۲-۲۸
۳	۲۰۰۵-۰۱-۰۳	۱۰	۲۰۱۴-۰۲-۲۸
۴	۲۰۰۶-۱۲-۰۷	۱۱	۲۰۱۴-۰۸-۲۶
۵	۲۰۰۸-۰۳-۲۶	۱۲	۲۰۱۵-۰۸-۲۹
۶	۲۰۱۰-۰۵-۰۹	۱۳	۲۰۱۵-۱۰-۰۶
۷	۲۰۰۶-۰۶-۱۹	۱۴	۲۰۱۶-۰۳-۲۸

همبستگی بیشتر (CC) و خطای کمتر (RMSE) مد نظر بوده و از این دیدگاه پیکربندی‌های متفاوت رده‌بندی شدند.

جمع‌بندی نتایج پارامترهای آماری (که به علت حجم زیاد از ارائه آنها در اینجا صرف نظر شده) نشان می‌دهد که از دیدگاه مناسب‌ترین عملکرد، پیکربندی‌ها مطابق شماره هر یک در جدول ۱، به صورت ۳، ۵، ۷، ۸، ۱، ۶، ۴، ۲ از بیشترین امتیاز به کمترین مرتب می‌شوند. لذا پیکربندی شماره ۳ (با ترکیب: خردفیزیک، Lin، تابش طول‌موج بلند RRTM، تابش طول‌موج کوتاه Goddard، لایه سطحی Eta، سطح زمین Noah، لایه مرزی MYJ و کومه‌ای Kain-ritsch) که بالاترین امتیاز را داشته، به‌عنوان پیکربندی منتخب برای سامانه هواشناسی-پاشش مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه به بخش دوم کار حاضر که محاسبات پاشش توسط سامانه جفت‌شده هواشناسی-پاشش است پرداخته و نتایج این سامانه برای چند خروجی مدل WRF ارائه می‌شود.

۳-۲ مدل HYSPLIT

این مدل توسط NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)، WMO (World Meteorological Organization) و IAEA (International Atomic Energy Agency) که مسئولیت پیش‌بینی پاشش جوی در حوادث بزرگ هسته‌ای را دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل این مطلب توانایی مناسب مدل و همچنین مناسب بودن آن برای انجام چنین شبیه‌سازی می‌باشد. از جمله موارد کاربرد اصلی این مدل می‌توان به ردیابی و پیش‌بینی انتشار مواد رادیواکتیو، خاکسترهای آتش‌فشانی، دود حاصل از آتش‌سوزی و آلاینده‌های ناشی از منابع آلودگی ساکن و متحرک، در جو اشاره نمود. جنبه‌های متفاوت این مدل و همچنین

همان‌گونه که ذکر شد دسته دوم داده‌ها برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی شبیه‌سازی‌های مدل WRF مورد نیاز هستند. برای رسیدن به این هدف از داده‌های NCEP/FNL (National Centers for Environmental Prediction) که از نوع داده‌های تحلیل هستند، استفاده شد.

با انجام شبیه‌سازی‌های مدل WRF برای تمامی تاریخ‌های جدول ۳ و برای تمامی ۸ پیکربندی و البته با استفاده از داده‌های FNL، ارزیابی خروجی‌های حاصل از پیش‌بینی‌های مدل WRF در نقاط مشاهدات شامل ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی، نیروگاه و نقاط ماهواره‌ای (ASCAT, QuikSCAT) با استفاده از پارامترها و سنجه‌های آماری مانند جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی صورت گرفت.

در ادامه پس از انجام محاسبات مربوط به پارامترهای آماری و بررسی نتایج آنها می‌توان در مورد پیکربندی منتخب مدل از دیدگاه پارامترسازی‌های فیزیکی قضاوت نمود. در واقع برای پیدا نمودن پیکربندی مناسب نیاز است تا میزانی که هر یک از پیکربندی‌ها در شبیه‌سازی‌های مدل موفق عمل نموده‌اند، محاسبه نمود و سپس از میان آنها پیکربندی را که دارای امتیاز بیشتر است، انتخاب نمود. برای رسیدن به این هدف به این شکل عمل شده که برای تمامی داده‌ها و تمامی نقاط مورد استفاده عملکردهای هر یک از پیکربندی‌ها از دیدگاه ضریب

مدل آهنگ پاشش با استفاده از داده‌های نیمرخ قائم پخشندگی (Vertical Diffusivity Profile)، چینش باد (Wind Shear) و تغییر شکل افقی میدان باد محاسبه می‌شود. این مدل طی دو دهه گذشته در حال تکامل بوده است.

۲-۳-۱ محاسبات مربوط به میدان‌های هواشناسی
مدل HYSPLIT برای انجام شبه‌سازی به داده‌های میدان‌های هواشناسی با بازه‌های زمانی ثابت (به‌عنوان مثال ۳ ساعته) نیاز دارد؛ که البته این بازه زمانی به مدل هواشناسی مورد استفاده وابسته است. همچنین این مدل توانایی استفاده از داده‌های هواشناسی با مختصه‌های قائم متفاوت را نیز دارا می‌باشد. در مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا با توجه به معادلات حاکم مورد استفاده، شیوه حل عددی معادلات و همچنین ملاحظات دینامیکی از مختصه‌های قائم متفاوت استفاده می‌شود. مدل می‌تواند از داده‌های هواشناسی با مختصه‌های قائم فشار، سیگما و هیبرید فشار- سیگما استفاده کند. حداقل داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای انجام شبه‌سازی شامل مؤلفه‌های باد افقی، دما، ارتفاع یا فشار و فشار در یک تراز مرجع هستند.

۲-۳-۲ محاسبه فرارفت

مبنای مدل لاگراژی این است که پاشش با دنبال کردن ذره یا پاف، محاسبه می‌شود؛ یعنی فرارفت یک ذره به‌طور مستقل محاسبه می‌شود؛ بنابراین پس از اینکه داده‌های مربوط به میدان‌های پایه هواشناسی پردازش شدند و مؤلفه‌های میدان باد سه‌بعدی به شبکه داخلی مورد استفاده در مدل HYSPLIT میان‌یابی و وارد شدند، خط سیرها (یعنی جملات انتگرالی فرارفت ذره) را می‌توان جهت آزمودن فرارفت مدل، محاسبه کرد. فرارفت یک ذره یا پاف از روی میانگین بردارهای سه‌بعدی سرعت در

کاربردهای آن توسط توسعه‌دهندگان مدل و به‌علاوه توسط سایر محققین مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آنها می‌توان به کارهای انجام شده توسط دراکسلر و هس (۱۹۹۷)، دراکسلر و هس (۱۹۹۸)، دراکسلر (۱۹۹۹)، دراکسلر (۲۰۰۶)، دراکسلر و همکاران (۱۹۹۷)، هوسپاداس (۱۹۹۹)، ژاسیولیونیس و رزکف (۲۰۰۶) تینکر و همکاران (۲۰۱۰) چالا و همکاران (۲۰۰۸) اشاره نمود.

نکته مهمی که در اینجا می‌بایست به آن اشاره نمود این است که آزمایش‌های صحت‌سنجی مدل (Verification) توسط توسعه‌دهندگان به انجام رسیده است. علاوه بر آزمایش‌های مذکور پاره‌ای آزمایش‌های اعتبارسنجی (Validation) نیز با داده‌های مشاهداتی برای مدل مذکور انجام شده که نشان از توانایی مناسب مدل دارد (دراکسلر و هس ۱۹۹۸، دراکسلر ۱۹۹۶). البته بهتر است اعتبارسنجی برای هر مکانی که در نظر است تا مدل در آنجا استفاده شود، به‌انجام برسد. در کار حاضر نیز اعتبارسنجی مدل HYSPLIT بر اساس مقایسه نتایج اجرای مدل با استفاده از مشاهدات بلند مدت دکل هواشناسی ۱۰۰ متری نیروگاه و مقایسه نتایج آن با گزارش محیطی (Environmental Report, ER) و تحلیل ایمنی نیروگاه (Final Safety Analysis Report, FSAR) انجام خواهد شد.

این مدل برای شبه‌سازی پاشندگی آلاینده‌های رها شده در هوا به کار می‌رود و توانایی شبه‌سازی مسیر ذرات آلاینده و همچنین نحوه پاشندگی (پخش) و نهشت ذرات آلاینده رها شده را دارا می‌باشد. محاسبات مربوط به پاشندگی در این مدل به‌صورت ترکیبی بوده و در عمل پیوندی از روش‌های لاگراژی و اوپلری می‌باشد. مدل از داده‌های هواشناسی خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا که بر روی نقاط یک شبکه (منظم) قرار دارند به‌عنوان ورودی و محاسبه داده‌های مورد نیاز جهت انجام شبه‌سازی پاشش جوی استفاده می‌کند. همچنین در این

۲-۳-۳ محاسبه پاشش و نهشت

بخش اصلی مدل HYSPLIT به محاسبات و شبیه‌سازی پاشش اختصاص دارد. در نسخه چهارم از مدل روش هیبرید ارائه شده توسط هرلی (۱۹۹۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش ارائه شده توسط هرلی جهت انجام محاسبات از پاشش ذرات در راستای قائم و پاشش پاف در راستای افق استفاده می‌شود. در مدل صرف‌نظر از اینکه چه روشی به کار رفته، ضریب‌های پایداری و اختلاط باید از روی داده‌های هواشناسی محاسبه شوند. این مدل توانایی انجام محاسبات مربوط به نهشت را نیز دارا می‌باشد. سه سازوکار متفاوت برای نهشت وجود دارد که امکان شبیه‌سازی آنها توسط مدل فراهم شده است. این سه سازوکار عبارت از نهشت خشک، نهشت مرطوب و واپاشی رادیواکتیو می‌باشند.

وضعیت اولیه $P(t)$ و یک حدس اولیه $P'(t+ t)$ محاسبه می‌شود. بردارهای سرعت، $V(P,t)$ به‌طور خطی در مکان و زمان درون‌یابی می‌شوند. موقعیت مربوط به حدس اولیه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P,t)\Delta t, \quad (3)$$

و موقعیت نهایی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5[V(P,t) + V(P',t + \Delta t)]\Delta t. \quad (4)$$

توضیحات بیشتر مربوط به جزئیات روش مورد استفاده برای انتگرال‌گیری و محاسبات مربوط به تحلیل خط سیر توسط کریزیگ (۲۰۰۶) و دراکسلر (۱۹۹۶) بیان شده‌اند.

جدول ۴. ساختار فایل ورودی هواشناسی برای اعتبارسنجی مدل پاشندگی HYSPLIT برای ارتفاع ۱۰۰ متری (ارتفاع دودکش نیروگاه) و برای سال ۲۰۱۰ میلادی.

ردیف	سال	ماه	روز	ساعت	سرعت باد ۱۰۰ متری (m/s)	جهت باد ۱۰۰ متری (درجه)	ارتفاع آمیختگی (m)	پایداری
1	2010	1	1	0	7.3	333	59	D
2	2010	1	1	1	7.9	327	110	D
3	2010	1	1	2	7.9	316	116	D
4	2010	1	1	3	7.9	301	99	D
5	2010	1	1	4	6.3	311	100	E
6	2010	1	1	5	5	359	60	D
7	2010	1	1	6	6.1	5	73	D
8	2010	1	1	7	3.5	346	164	C
9	2010	1	1	8	3.5	284	475	B
10	2010	1	1	9	5.2	289	761	B
11	2010	1	1	10	6	307	883	C
12	2010	1	1	11	5.7	306	939	C
13	2010	1	1	12	8.6	291	990	C
14	2010	1	1	13	7.9	300	793	C
15	2010	1	1	14	8.3	278	318	C

جدول ۵. فهرست و مشخصات عناصر رها شده از دودکش نیروگاه برای شرایط کارکرد عادی (FSAR, 2015) و ضرایب تبدیل دز (ICRP 60, 72).

ردیف	عنصر	نیمه‌عمر $T_{1/2}(s)$	مقدار رهاسازی Bq/hr	استنشاق Sv/Bq	ضریب تبدیل دُز سطح زمین Sv/h/Bq/m ²	پلوم Sv/h/Bq/m ³
1	Ba-139	4.99E+03	1.71E+04	3.40E-11	5.26E-11	9.14E-10
2	Ba-140	1.10E+06	6.34E+02	1.00E-09	9.43E-14	6.80E-13
3	Br-84	1.91E+03	3.31E+03	2.20E-11	6.01E-12	3.25E-10
3	Ce-141	2.81E+06	1.50E+02	2.40E-09	2.76E-13	2.99E-11
4	Ce-144	2.46E+07	2.43E+01	1.00E-07	6.77E-14	4.21E-11
5	Co-58	6.12E+06	5.46E+01	2.90E-09	3.08E-12	1.38E-14
6	Co-60	1.66E+08	3.37E+02	5.90E-08	7.13E-12	1.58E-10
7	Cr-51	2.39E+06	8.41E+01	2.00E-11	1.07E-13	4.97E-12
8	Cs-134	6.50E+07	4.29E+04	1.30E-08	4.93E-12	4.07E-10
9	Cs-137	9.46E+08	6.96E+04	8.60E-09	8.46E-15	2.58E-13
10	Cs-138	1.93E+03	2.00E+04	2.40E-11	8.14E-12	4.14E-10
11	Fe-59	3.86E+06	8.15E+00	2.20E-09	3.96E-12	2.02E-10
12	I-131	6.95E+05	6.77E+04	8.10E-09	1.27E-12	1.32E-12
13	I-132	8.28E+03	7.88E+05	9.70E-11	7.34E-12	3.74E-10
14	I-133	7.48E+04	1.83E+06	1.50E-09	2.07E-12	9.68E-11
15	I-134	3.15E+03	3.42E+05	3.50E-11	8.32E-12	4.32E-10
16	I-135	2.38E+04	1.26E+06	3.10E-10	4.64E-12	2.61E-10
17	K-42	4.45E+04	1.37E+04	1.20E-10	1.43E-12	5.33E-11
18	Kr-85	3.38E+08	2.75E+07	0.00E+00	0.00E+00	8.21E-13
20	Kr-85m	1.61E+04	1.60E+08	0.00E+00	0.00E+00	2.60E-11
21	Kr-87	4.55E+03	1.14E+08	0.00E+00	0.00E+00	1.43E-10
22	Kr-88	1.02E+04	4.00E+08	0.00E+00	0.00E+00	3.55E-10
23	La-140	1.45E+05	9.29E+01	1.30E-09	6.88E-12	3.85E-10
24	Mn-54	2.70E+07	3.60E+01	2.00E-09	2.85E-12	1.38E-10
25	Mo-99	2.38E+05	1.11E+02	1.10E-09	6.26E-13	2.58E-11
26	Na-24	5.40E+04	2.97E+04	2.70E-10	1.29E-11	7.49E-10
27	Nb-95	3.04E+06	2.31E+00	1.60E-09	2.42E-12	1.25E-10
28	Nb-97	4.33E+03	2.40E+03	2.10E-11	2.43E-12	1.08E-10
29	Pr-144	1.04E+03	2.28E+00	1.80E-11	5.87E-13	9.54E-12
30	Rb-88	1.07E+03	2.28E+04	1.60E-11	2.67E-12	1.20E-10
31	Rb-89	9.26E+02	7.42E+03	1.40E-11	7.09E-12	3.64E-10
32	Ru-103	3.39E+06	9.84E+01	2.40E-09	1.56E-12	7.60E-11
33	Sr-89	4.35E+06	3.05E+02	1.10E-08	2.43E-13	1.36E-12
34	Sr-90	9.18E+08	1.08E+00	3.50E-07	4.97E-15	3.30E-13
35	Sr-91	3.42E+04	1.11E+04	4.50E-10	2.36E-12	1.14E-10
36	Sr-92	9.76E+03	1.11E+04	9.80E-11	4.43E-12	2.31E-10
37	Te-131	1.50E+03	1.60E+03	6.80E-11	1.71E-12	6.91E-11
38	Te-132	2.81E+05	1.44E+03	8.60E-11	3.46E-14	1.14E-12

ادامه جدول ۵.

ردیف	عنصر	نیمه عمر $T_{1/2}(s)$	مقدار رهاسازی Bq/hr	استنشاق Sv/Bq	ضریب تبدیل دُز سطح زمین Sv/h/Bq/m ²	پلوم Sv/h/Bq/m ³
39	Te-133	7.47E+02	1.43E+03	1.90E-11	3.45E-12	1.56E-10
40	Xe-133	4.53E+05	9.10E+08	0.00E+00	0.00E+00	5.58E-12
41	Xe-135	3.27E+04	3.88E+08	0.00E+00	0.00E+00	3.96E-11
42	Xe-138	8.48E+02	2.00E+07	0.00E+00	0.00E+00	3.96E-11
43	Zr-95	5.53E+06	1.43E+02	6.50E-09	2.34E-12	1.20E-10
44	Zr-97	6.08E+04	7.42E+03	1.20E-09	8.32E-13	3.11E-11

۲-۴ اعتبارسنجی مدل HYSPLIT برای منطقه نیروگاه بوشهر

در اینجا به تشریح نحوه اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های مدل HYSPLIT برای منطقه نیروگاه بوشهر پرداخته می‌شود. مدل برای انجام شبیه‌سازی اعتبارسنجی نیاز به داده‌های هواشناسی نیروگاه دارد. این داده‌ها از اندازه‌گیری‌های دکل هواشناسی ۱۰۰ متری در داخل سایت نیروگاه تأمین گردید. مشاهدات سامانه جمع‌آوری داده‌های پارامترهای جوی دکل هواشناسی نیروگاه (زمان نمونه‌برداری ۵ ثانیه و ثبت شده به صورت هر دقیقه یک‌بار) در ترازهای ۱۰، ۴۵، ۸۰ و ۱۰۰ متری انجام می‌شود، برای این مورد داده‌های اندازه‌گیری سال ۲۰۱۰، پردازش و میانگین‌گیری ساعتی شد. سپس به کمک روابط لایه مرزی جو که توسط وان‌اولدن و هولتسلاگ (۱۹۸۵) ارائه شده‌اند، پارامترهای مورد نیاز اعتبارسنجی از قبیل کلاس پایداری و ارتفاع آمیختگی محاسبه و در نهایت فایل هواشناسی مورد نیاز مدل HYSPLIT آماده شد. در مجموع ۷۵۴۷ ساعت رکورد داده (تقریباً ۱ سال) پس از پردازش به دست آمد. نمونه‌ای از این فایل هواشناسی در جدول ۴ آمده است.

با آماده‌سازی ورودی هواشناسی مدل پاشندگی، ورودی دیگر مدل یعنی مقادیر چشمه تهیه گردید. مطابق گزارش ایمنی نیروگاه (FSAR نسخه ۲۰۱۵)، در مجموع

۴۴ رادیونوکلئید به‌عنوان ورودی چشمه مدل پاشش استفاده شد. در جدول ۵ خلاصه مشخصات عناصر رهاسازی از دودکش نیروگاه و ضریب تبدیل دُز (Dose Conversion Factor) که از گزارش‌های ICRP 60 (International Commission on Radiological Protection)، ۱۹۹۱ و ICRP 72، ۱۹۹۵ استخراج شده‌اند برای هر یک از رادیونوکلئیدها و برای مسیرهای مختلف پرتوگیری از جمله پلوم (Cloud Shine)، سطح زمین (Ground Shine) و استنشاق (Inhalation) ارائه شده است. با اتمام آماده‌سازی فایل‌های ورودی مدل پاشندگی کار اعتبارسنجی مدل HYSPLIT آغاز می‌شود.

۲-۴-۱ نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی مدل HYSPLIT

در اینجا نتایج مربوط به شبیه‌سازی پاشش با استفاده از مدل HYSPLIT برای اعتبارسنجی این مدل در شرایط کارکرد عادی نیروگاه ذکر می‌شود. شبیه‌سازی برای تمامی رادیونوکلئیدهای جدول ۵ و با لحاظ نمودن ضریب واپاشی برای تک‌تک عناصر که تابعی از نیمه‌عمر است، انجام شده است. شبیه‌سازی در محدوده ۲۵۰ km اطراف نیروگاه با تفکیک افقی $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ، (۱ km × ۱ km)، انجام شد (جدول ۶). در مدت شبیه‌سازی بیش از یک میلیون ذره رها گردید. گام زمانی محاسبات برابر ۰/۷۵ گام شبکه برای حرکت یک ذره انتخاب شد (جدول ۶).

مناسبتی با الگوی شبه‌سازی مدل HYSPLIT در شکل ۵-الف دارد. همچنین مقایسه این الگو با گلباد سالیانه نیروگاه در شکل ۵-د همخوانی بسیار خوبی با مشاهدات میدان باد نیروگاه نشان می‌دهد.

مرحله دوم ارزیابی، به صورت کمی و شامل مقایسه نتایج محاسبات دُز مؤثر برای گروه سنی بزرگسال توسط مدل پاشش HYSPLIT با نتایج گزارش‌های محیطی و ایمنی نیروگاه می‌باشد، همچنین نتایج با مقدار حد دز (Dose Limit) برای شرایط کارکرد عادی نیروگاه که توسط مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور اعلام می‌شود (اینرا، ۲۰۰۸) مقایسه شده است (مقدار حد دُز سالانه برای کار عادی نیروگاه، 10^{-4} Sv = 10^{-4} Sv است). مقدار دُز معادل مؤثر محاسبه شده در کار حاضر برابر مجموع دُز از مسیرهای پرتوگیری از جمله پلوم، سطح زمین و استنشاق است. روابط مورد استفاده در محاسبه دُز برای هر یک از این مسیرها در مدرک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (۲۰۰۱) و کار زالی و همکاران (۲۰۱۷) شرح داده شده است. با استفاده از این روابط در مدل پاشش HYSPLIT دز معادل مؤثر گروه سنی بزرگسال محاسبه شد. شکل ۶ الگوی توزیع دز مؤثر به دست آمده از محاسبات اعتبارسنجی مدل پاشش HYSPLIT را نشان می‌دهد. در گزارش‌های محیطی و ایمنی نیروگاه نقشه توزیع و الگوی پرتوگیری ارائه نشده است. نتایج دُز معادل مؤثر بیشینه، برای گروه سنی بزرگسال برای کار حاضر و گزارش‌های اشاره شده در جدول ۷ ارائه شده است. مقایسه نتایج شبه‌سازی انجام شده با این گزارش‌ها و همچنین مقادیر نسبت دز محاسبه شده به حد دز (برحسب درصد بیان شده است) نشان‌دهنده این مطلب است که شبه‌سازی و نتایج محاسبات دز انجام شده با مدل HYSPLIT معتبر بوده و از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

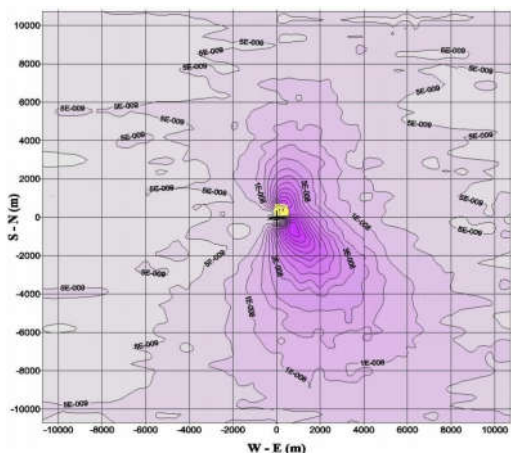
زمان شبه‌سازی ۷۵۴۷ ساعت می‌باشد و با توجه به شرایط کار عادی نیروگاه، فرض می‌شود که در تمام مدت انجام شبه‌سازی آلاینده در حال رهاسازی می‌باشد. تمامی پارامترها و مشخصات مورد استفاده برای انجام شبه‌سازی در جدول ۶ ذکر شده‌اند.

جدول ۶. مشخصات مربوط به شبه‌سازی اعتبارسنجی مدل پاشش HYSPLIT.

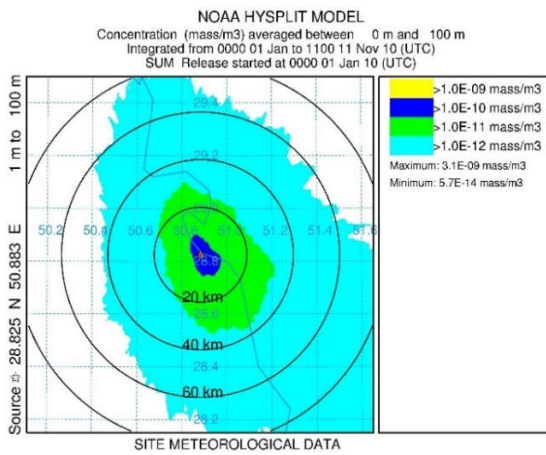
مقدار	مشخصه
۰۰ UTC روز اول ژانویه ۲۰۱۰ میلادی	زمان شروع شبه‌سازی (ساعت، روز و سال):
۱۱ UTC روز یازدهم نوامبر ۲۰۱۰ میلادی	زمان اتمام شبه‌سازی (ساعت، روز و سال):
طول جغرافیایی: ۵۰/۸۸۳۱، عرض جغرافیایی: ۲۸/۸۲۵۱	طول و عرض جغرافیایی نقطه رهاسازی:
۱۰۰ متر	ارتفاع نقطه رهاسازی:
۲۵۰ کیلومتر	مقیاس افقی پاشش:
۰/۰۱ درجه معادل با حدود ۱ کیلومتر	تفکیک مکانی:
۰۰۰،۰۰۰،۰۱	تعداد ذرات رهاسازی:
۴۴ رادیونوکلئید برای شرایط کار عادی نیروگاه	آلاینده:
Bq/hr برای هر یک از رادیونوکلئیدها	آهنگ گسیل آلاینده:

برای آنکه بتوان نحوه پاشش آلاینده‌ها را به خوبی مشاهده نمود نمایش نتایج حاصل از شبه‌سازی به صورت گرافیکی ارائه شده است. شکل ۵ شبه‌سازی بلند مدت (سالانه) پاشش نیروگاه با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری دکل هواشناسی نیروگاه را نشان می‌دهد.

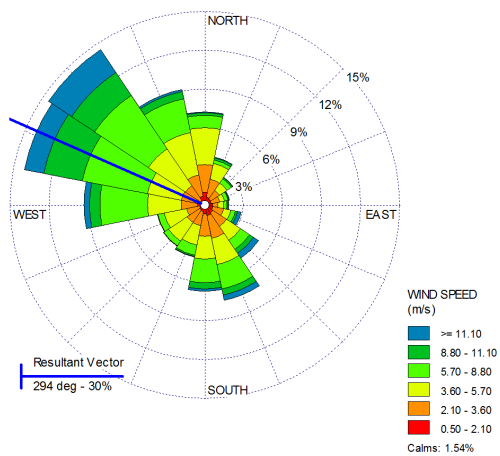
اولین مرحله اعتبارسنجی مدل HYSPLIT به صورت کیفی و شامل مقایسه الگوی شبه‌سازی پاشندگی سالانه با الگوهای استخراج شده از گزارش‌های محیطی نیروگاه می‌باشد. همچنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوی پاشش شرایط کار عادی نیروگاه برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۰ میلادی (حاصل از اجرای مدل گوسی پخش) که در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج نشان داده شده است برآزش



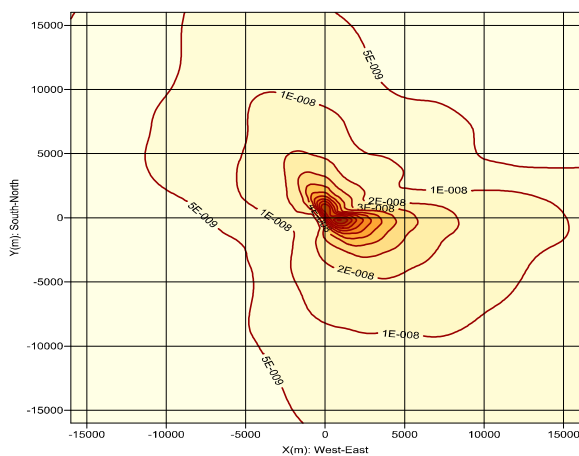
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

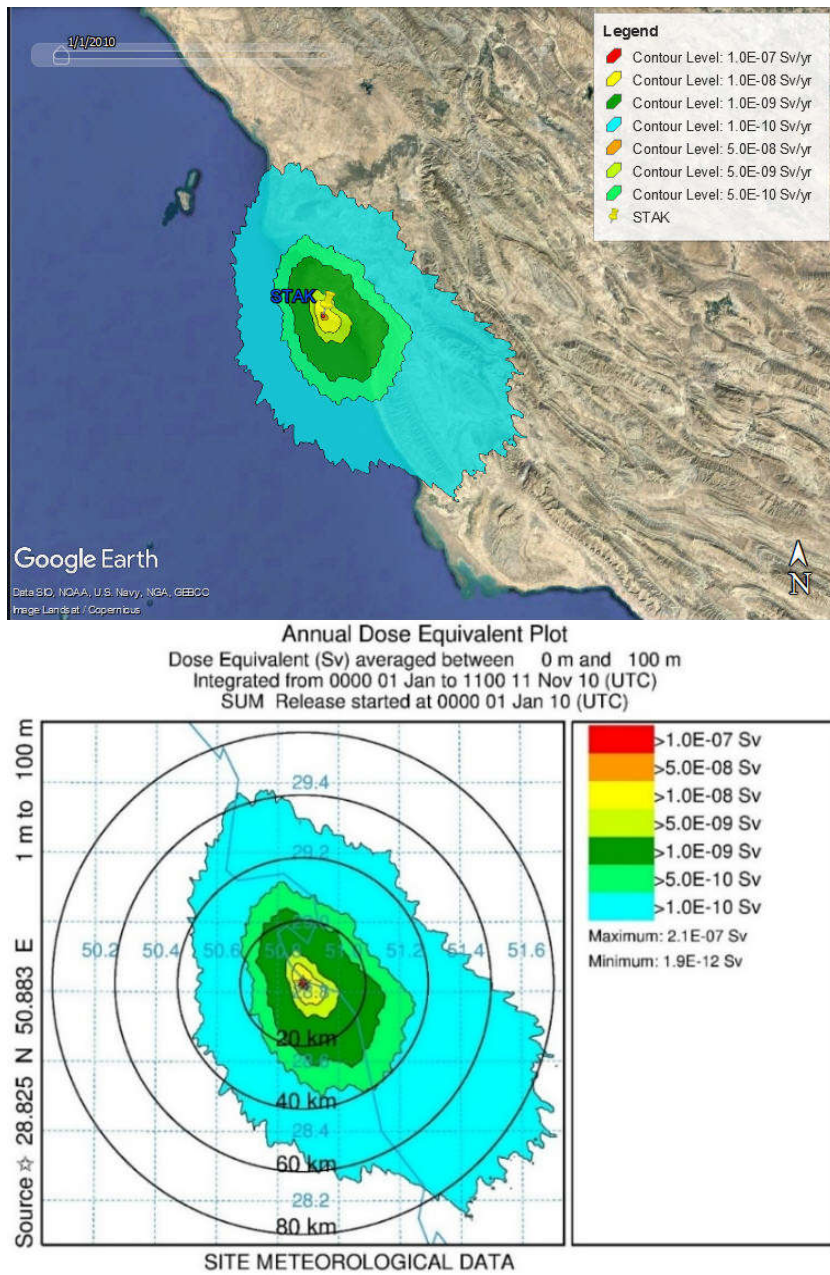
شکل ۵. الگوی پاشندگی و انتشار جوی نیروگاه بوشهر: (الف) کار حاضر، (ب) سال ۲۰۰۳، (ج) سال ۲۰۱۰، (د) گلباد سال ۲۰۱۰.

جدول ۷. دز معادل مؤثر بیشینه سالانه، گروه سنی بزرگسال (Sv/yr) برای اعتبارسنجی مدل HYSPLIT: گزارش‌های ER (۲۰۰۳ و ۲۰۱۵) و FSAR (۲۰۱۵)، سهرابی و همکاران (۲۰۱۳)، زالی و همکاران (۲۰۱۷) و کار حاضر.

سهرابی و همکاران (۲۰۱۳)	زالی و همکاران (۲۰۱۷)	گزارش، ER (۲۰۰۳)	گزارش، ER (۲۰۱۳)	گزارش، ΔFSAR (۲۰۱۵)	کار حاضر	حد دز*
$1/3 \times 10^{-7}$	$3/8 \times 10^{-8}$	$1/6 \times 10^{-7}$	$5/1 \times 10^{-8}$	$7/7 \times 10^{-8}$	$2/1 \times 10^{-7}$	1×10^{-4}
۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۲۱	نسبت دز محاسبه شده به حد دز (/.).

* حد دز پرتوگیری مردم برای کارکرد عادی نیروگاه، INRA (۱ mSv/yr).

Δ دز محاسبه شده برای شرایط نرمال در گزارش تحلیل ایمنی نیروگاه (FSAR).



شکل ۶. الگوی دز معادل مؤثر سالانه کارکرد عادی نیروگاه حاصل از شبیه‌سازی مدل پاشندگی HYSPLIT برای سال ۲۰۱۰ میلادی.

مرحله سوم ارزیابی شامل مقایسه نتایج کار اعتبارسنجی مدل HYSPLIT با کارهای انجام شده توسط دیگران می‌باشد. در این مورد نتایج شبیه‌سازی با کار سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) و زالی و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه شد. سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) محاسبات پرتوگیری برای شرایط کارکرد عادی نیروگاه را با کد PC-CREAM که توسط اتحادیه اروپا (۲۰۰۲) توسعه داده شده انجام دادند. آنها داده‌های هواشناسی مورد نیاز را از مشاهدات دکل هواشناسی نیروگاه برای سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ میلادی و مقادیر چشمه را از گزارش FSAR استخراج کردند. آنها همچنین مقایسه‌ای بین نتایج کارشان با مقادیر دز محیطی (Environmental Dose)

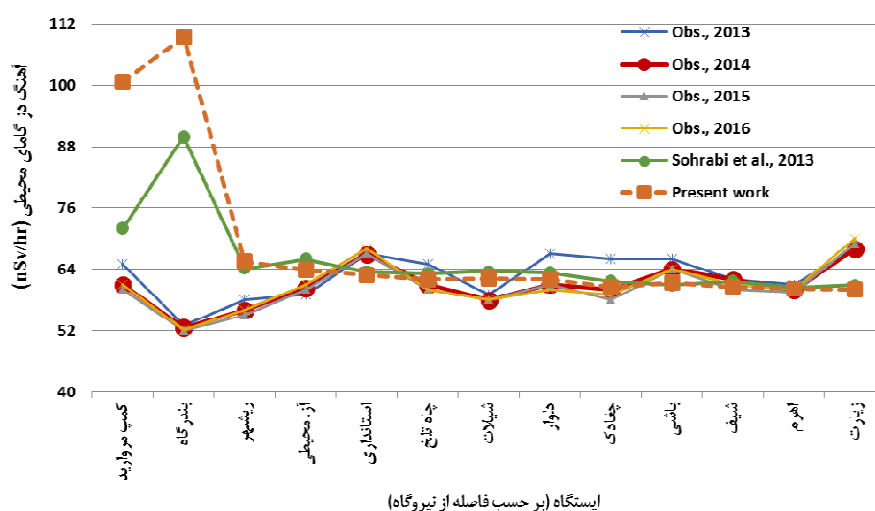
مقایسه نتایج کار اعتبارسنجی مدل HYSPLIT با کارهای انجام شده توسط دیگران می‌باشد. در این مورد نتایج شبیه‌سازی با کار سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) و زالی و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه شد. سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) محاسبات پرتوگیری برای شرایط کارکرد عادی نیروگاه را با کد

۷۱ داده شده است (UNSCEAR، ۲۰۰۰)، سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) مقدار 60 ± 5 nSv/hr را به کار بردند. هرچند مقادیر ذکر شده اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد، اما به‌هرحال برای کار حاضر نتایج کار پاشازاده و همکاران (۲۰۱۴) استفاده گردید. میانگین سالانه مشاهدات این شبکه برای دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ میلادی، کار سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) و نتایج کار حاضر در جدول ۹ ارائه شده است. نمودار این مقایسه در شکل ۷ نشان داده شده است.

حاصل از مشاهدات شبکه پایش پرتوی نیروگاه انجام دادند. این شبکه شامل ۱۷ ایستگاه اندازه‌گیری بوده و تا شعاع ۶۰ کیلومتری نیروگاه را پوشش می‌دهد (جدول ۸). مشاهدات این شبکه دربرگیرنده مقادیر دز گامای زمینه محیط (Background, BG) محیط نیز می‌باشد، مقدار زمینه بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در حدود 60 ± 8 nSv/hr است (پاشازاده و همکاران، ۲۰۱۴). محدوده دز گامای زمینه برای کشور ایران در مراجع بین‌المللی برابر $130-36$ nSv/hr با مقدار میانگین nSv/hr

جدول ۸. مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری دز محیطی.

ردیف	نام ایستگاه	فاصله از نیروگاه (km)	جهت	ردیف	نام ایستگاه	فاصله از نیروگاه (km)	جهت
۱	کمپ مروارید	1.5	NE	۱۰	چغادک	22.5	NE
۲	بندرگاه	2.0	E	۱۱	باشی	24.7	SE
۳	حریم	5.4	N	۱۲	شیف	26.6	N
۴	ریشهر	8.5	NNW	۱۳	بوالخیر	37.9	SE
۵	آزمحیطی	11.0	N	۱۴	اهرم	39.7	E
۶	استانداری	15.1	N	۱۵	خورموج	42.7	E
۷	چاه تلخ	15.4	E	۱۶	زیارت	54.0	NNE
۸	شیلات	17.2	NNW	۱۷	هدکان	59.3	SE
۹	دلوار	18.8	ESE				



شکل ۷. نمودار دز محیطی میانگین سالانه (nSv/hr): مشاهدات (Obs.)، سهرابی و همکاران و کار حاضر (دز محیطی برابر است با: مقدار دز محاسبه شده به‌علاوه مقدار زمینه).

جدول ۹. مقادیر میانگین و انحراف معیار دز محیطی (nSv/hr) ایستگاه‌های شبکه پاشش: مشاهدات ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ میلادی (سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) و کار حاضر).

ردیف	ایستگاه	سهرابی و همکاران			کار حاضر		
		Obs.±STD (with BG)	Calculated (without BG)	Obs.±STD (with BG)	Obs.±STD (with BG)	Calculated (without BG)	Obs.±STD (with BG)
۱	کمپ‌مروارید	65 ± 1	12	65 ± 1	40.7	60 ± 2	61 ± 5
۲	بندرگاه	53 ± 0	30	53 ± 0	49.4	52 ± 2	52 ± 2
۳	حریم	*	*	*	11.6	60 ± 2	60 ± 2
۴	ریشهر	58 ± 1	4.2	58 ± 1	5.6	55 ± 2	56 ± 2
۵	آز. محیطی	59 ± 1	6	59 ± 1	3.9	60 ± 3	61 ± 3
۶	استانداری	67 ± 1	3.5	67 ± 1	2.9	67 ± 2	68 ± 2
۷	چاه تلخ	65 ± 1	3.2	65 ± 1	2.1	60 ± 2	60 ± 2
۸	شیلات	59 ± 1	3.6	59 ± 1	2.2	58 ± 2	58 ± 2
۹	دلوار	67 ± 2	3.4	67 ± 2	2.0	61 ± 3	60 ± 3
۱۰	چغادک	66 ± 1	1.7	66 ± 1	0.6	58 ± 2	59 ± 3
۱۱	باشی	66 ± 1	0.9	66 ± 1	1.4	64 ± 2	64 ± 2
۱۲	شیف	62 ± 1	1.7	62 ± 1	0.5	60 ± 2	61 ± 2
۱۳	بوالخیر	*	*	*	0.6	56 ± 2	56 ± 2
۱۴	اهرم	61 ± 1	0.5	61 ± 1	0.2	60 ± 2	60 ± 2
۱۵	خورموج	*	*	*	0.3	63 ± 2	64 ± 2
۱۶	زیارت	68 ± 1	0.9	68 ± 1	0.1	69 ± 4	70 ± 4
۱۷	هدکان	*	*	*	0.2	51 ± 2	51 ± 2

پاشش و محاسبات پرتوگیری برخوردار است. بعد از اتمام اعتبارسنجی مدل HYSPLIT، برای ادامه کار از پیش‌بینی‌های مدل WRF به‌عنوان ورودی هواشناسی مدل HYSPLIT برای شبیه‌سازی پاشش و پیش‌بینی دز به‌صورت جفت‌شده برای شرایط کار عادی نیروگاه استفاده می‌شود.

۳ داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT

داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT از خروجی مدل WRF با توجه به پیکربندی مناسب که روش تعیین آن در بخش ۲-۲ تشریح شد تأمین می‌شود. برای این منظور حوزه محاسباتی مورد استفاده همان است که برای حساسیت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل

همچنین، زالی و همکاران (۲۰۱۷) محاسبات دز را برای شرایط کار عادی نیروگاه با استفاده از مدل HYSPLIT انجام دادند. آنها داده‌های هواشناسی مورد نیاز را از NCEP در قالب داده‌های تحلیلی GDAS (Global Data Analysis System) و مقادیر چشمه را از گزارش FSAR تهیه نمودند. نتایج محاسبات هر یک و کار حاضر برای دز معادل مؤثر پیشینه سالانه گروه سنی بزرگسال به همراه مقادیر گزارش‌های ER و FSAR در جدول ۷ نشان داده شده است.

نتیجه مشترک جدول ۷ و ۹ و همچنین نمودار شکل ۷ که دربرگیرنده نتیجه شبیه‌سازی پاشش و محاسبات دز مدل HYSPLIT و نتایج گزارش‌های ایمنی و محیطی نیروگاه و کارهای دیگران می‌باشد، نشان می‌دهد که این مدل پاشش از اعتبار لازم و دقت مناسب برای شبیه‌سازی

لازم به ذکر است که به دلیل تعداد زیاد شبیه‌سازی‌های انجام شده در اینجا برای اختصار و نیز فقدان فضای کافی فقط نتایج شبیه‌سازی برای ۴ مورد از تاریخ‌های جدول ۱۱ ارائه شده است. برای هر یک از این تاریخ‌ها، میدان باد و گلباد ساعتی برای مدت‌زمان شروع تا پایان شبیه‌سازی (۲۴ ساعت) در شکل‌های ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ نشان داده شده است. تغییرات جهت باد در هر یک از این شکل‌ها در طول زمان شبیه‌سازی باعث تغییر الگوی پاشندگی می‌شود که در ادامه تشریح شده است.

گلباد ساعتی شبیه‌سازی برای تاریخ ۲۰۱۴/۰۱/۰۶ در شکل ۸ آمده است، در این تاریخ جهت باد از ESE در شروع شبیه‌سازی به NW در پایان شبیه‌سازی تغییر می‌یابد، که این شرایط باعث تغییر الگوی توزیع ذرات در مدت شبیه‌سازی شده است. الگوی پاشندگی پلوم ذرات رها شده از استک نیروگاه، برای ساعات ۹، ۱۸ و ۲۴ بعد از رهاسازی در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ساعات ابتدایی پاشندگی، پلوم دارای جهت NW بوده (شکل ۹-الف)، و در ساعات انتهایی شبیه‌سازی پلوم به سمت SE تغییر جهت می‌دهد (شکل ۹-ب و ۹-ج). همچنین برای درک بهتر رفتار پلوم، مقاطع طولی و عرضی پلوم ذرات در شکل ۹(د) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که چگالی ذرات در ارتفاع زیر ۲۵۰۰ متر بیشترین مقدار را

WRF استفاده گردید و شامل سه دامنه تودرتو (آشپانه‌ای) با تفکیک مکانی ۲۷ km، ۹ km و ۳ km می‌باشد (شکل ۲). مشخصات پیکربندی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مدل WRF در جدول ۱۰ ارائه شده است. لازم به ذکر است که زمان اجرای مدل WRF برای پیش‌بینی‌ها ۲۴ ساعت و تاریخ‌های مورد نظر برای انجام شبیه‌سازی مدل WRF از دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ میلادی و برای حداکثر مشاهدات شبکه دز محیطی نیروگاه انتخاب شدند. این تاریخ‌های منتخب که شامل ۲۰ مورد می‌باشد در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. با تنظیم ورودی‌های مدل WRF، این مدل برای هر یک از تاریخ‌های مورد نظر اجرا شد.

۴ انجام شبیه‌سازی‌های پاشش و ارزیابی دز برای شرایط کار عادی نیروگاه بوشهر با مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT

برای هر یک از تاریخ‌های منتخب در جدول ۱۱، شبیه‌سازی پاشش و محاسبات دز مؤثر روزانه برای ۲۴ ساعت اجرای مدل جفت‌شده هواشناسی- پاشندگی (WRF-HYSPLIT) انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر حد دز سالیانه کار عادی نیروگاه و همچنین با گزارش‌های ایمنی و محیطی نیروگاه و با کار دیگران از جمله، سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) و زالی و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه شده است.

جدول ۱۰. مشخصات شبکه محاسباتی و پیکربندی منتخب برای اجرای مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT.

دامنه‌ها:	حوزه ۱	حوزه ۲	حوزه ۳
تفکیک مکانی دامنه‌ها:	۲۷ km	۹ km	۳ km
مختصات مرکز شبکه:	۲۸ ۸۲ N	۵۰ ۸۸ E	
پیکربندی فیزیک:	خردفیزیک، Lin، تابش طول‌موج بلند RRTM، تابش طول‌موج کوتاه Goddard، مدل لایه سطحی Eta.		
تاریخ شبیه‌سازی:	سطح زمین Noah، لایه مرزی MYJ و همرفت‌کومه‌ای Kain-ritsch		
داده‌های اولیه و شرایط مرزی:	مطابق جدول ۱۱		
	NCEP/FNL		

جدول ۱۱. تاریخ‌های منتخب برای اجرای مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT.

ردیف	روز-ماه-سال	ردیف	روز-ماه-سال	ردیف	روز-ماه-سال
۱	۲۰۱۴-۰۱-۰۶	۸	۲۰۱۴-۱۱-۱۷	۱۵	۲۰۱۶-۰۱-۰۲
۲	۲۰۱۴-۰۱-۱۸	۹	۲۰۱۴-۱۲-۲	۱۶	۲۰۱۶-۰۳-۰۶
۳	۲۰۱۴-۰۱-۱۹	۱۰	۲۰۱۵-۰۲-۲۲	۱۷	۲۰۱۶-۰۸-۰۴
۴	۲۰۱۴-۱۰-۲۱	۱۱	۲۰۱۵-۱۱-۰۷	۱۸	۲۰۱۶-۰۸-۱۸
۵	۲۰۱۴-۱۰-۲۲	۱۲	۲۰۱۵-۱۲-۲۴	۱۹	۲۰۱۶-۱۱-۲۲
۶	۲۰۱۴-۱۱-۱۶	۱۳	۲۰۱۵-۱۲-۳۰	۲۰	۲۰۱۶-۱۲-۲۰
۷	۲۰۱۴-۱۱-۱۸	۱۴	۲۰۱۵-۱۲-۳۱		

محدوده N تا WNW نوسان دارد. سرعت باد در اکثر زمان‌ها در حدود ۴ m/s است. پاشش پلوم و مقاطع طولی و عرض آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. گسترش افقی پلوم در شکل‌های ۱۵-الف، ۱۵-ب و ۱۵-ج و پاشش در راستای قائم پلوم در شکل ۱۵-د ارائه شده است.

الگوهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی پاشش برای تاریخ‌های منتخب که در بالا تشریح شد نشان می‌دهد که رفتار و هندسه پلوم تابع میدان باد (سرعت و جهت) و خصوصیات لایه مرزی (تلاطم و پایداری جو) منطقه مورد مطالعه (در اینجا نیروگاه بوشهر) می‌باشد. لازم به ذکر است الگوی بلند مدت پاشش منطقه نیروگاه بوشهر، تابع جهت باد غالب در منطقه که شمال غربی (NW) است می‌باشد، این حالت در گلباد سالانه منطقه در شکل ۵(د) به‌خوبی آشکار است، اما به‌رحال کار حاضر نشان داد که تغییرات سرعت و جهت باد در مدت ۲۴ ساعت شبیه‌سازی می‌تواند تغییرات زیادی در الگوی پاشش و مسیر حرکت پلوم ایجاد نماید.

ذکر یک نکته در اینجا ضروری است، الگوی پاشش برای منطقه نیروگاه بوشهر از دیدگاه اقلیمی، هرچند از حوزه پژوهش حاضر خارج است، اما به‌عنوان

داشته و برخی دیگر خود را به سطوح بالاتر رسانده‌اند. این شکل تصویر قابل‌توجهی از پاشندگی در راستای قائم و عمق نفوذ پلوم که تابعی از تلاطم جوی است را نشان می‌دهد. چنین نتایجی در برنامه مقابله با شرایط اضطراری و تحلیل حوادث، برای پیش‌بینی مسیر پلوم آلودگی و برای تعیین سطوح اقدام مقابله حائز اهمیت است.

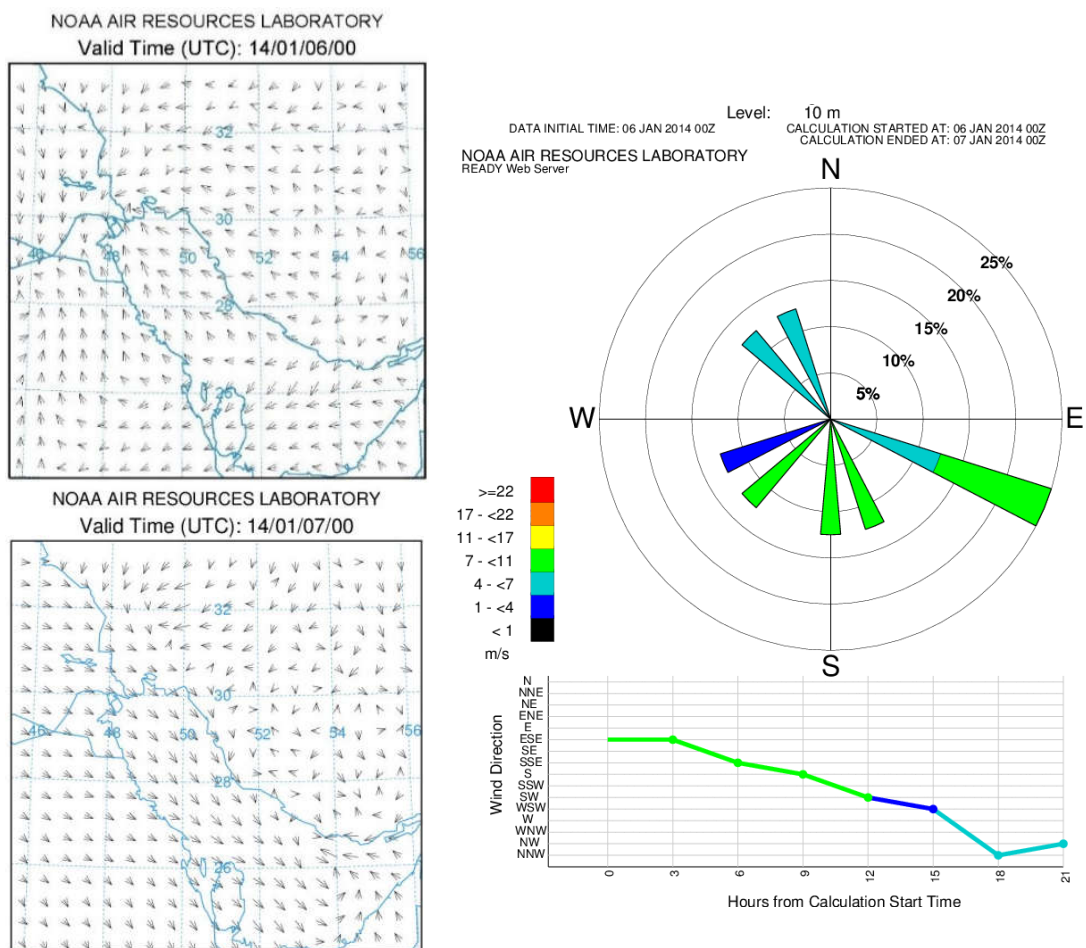
شکل ۱۰، گلباد ساعتی و میدان باد برداری سطح برای تاریخ ۲۰۱۴/۱۲/۰۲ را نشان می‌دهد، نکته قابل‌توجه در این شکل، تداوم جهت باد NNW برای مدت ۲۴ ساعت زمان شبیه‌سازی می‌باشد، که الگوی پاشش در جهت SE شکل ۱۱ را به دست می‌دهد، مطابق این شکل به دلیل پخش پلوم بر روی دریا و کاهش تلاطم لایه مرزی، گسترش افقی و قائم پلوم محدود شده است (کمتر از ۱۰۰۰ متر)، این حالت در شکل‌های ۱۱-ب، ۱۱-ج و ۱۱-د به‌خوبی نشان داده شده است.

گلباد ساعتی و میدان باد برداری سطح برای تاریخ ۲۰۱۵/۱۱/۰۷ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. جهت باد غالب در اکثر زمان‌ها NE بوده و سرعت آن کمتر از ۴ m/s است. پاشش پلوم و مقاطع طولی و عرض پلوم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. گسترش افقی پلوم در شکل‌های ۱۳-الف، ۱۳-ب و ۱۳-ج و گسترش قائم پلوم در راستای قائم در شکل ۱۳-د ارائه شده است.

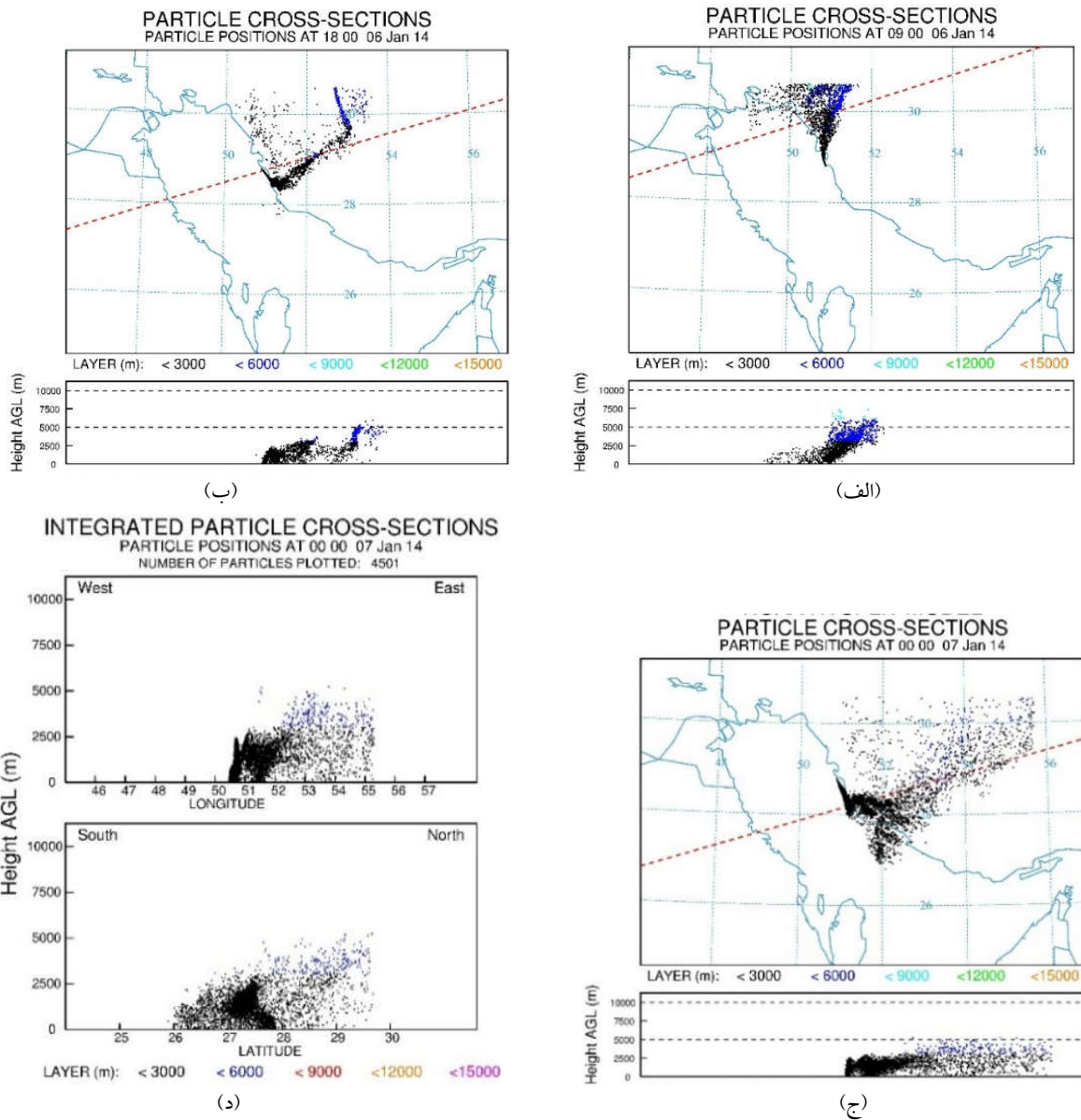
شکل ۱۴، گلباد ساعتی و میدان باد برداری سطح برای تاریخ ۲۰۱۶/۱۱/۲۲ را نشان می‌دهد، جهت باد غالب در

این مورد برخی مطالعات انجام شده که برای مثال می‌توان به کار ملکوتی و همکاران (۱۳۹۵)، کمیجانی و همکاران (۱۳۹۳) و بیدختی و مرادی (۱۳۸۴) اشاره نمود. هرچند پاشش بلندمدت منطقه نیروگاه در کار حاضر در بخش اعتبارسنجی مدل HYSPLIT مورد بررسی قرار گرفت، اما می‌تواند در پژوهش‌های آینده، به‌طور جداگانه و برای تأثیر هر یک از پدیده‌های محلی (از قبیل نسیم دریا - خشکی) بر الگوی پخش و انتشار مورد توجه قرار گیرد.

روشی برای مطالعات پاشش نیز قابل بررسی است. برای این منظور نیاز است سیمای اقلیمی منطقه که دربرگیرنده توزیع سالیانه رژیم سیستم‌های همدیدی منطقه می‌باشد شناسایی شده و تأثیر آنها بر میدان پارامترهای هواشناسی ناحیه مورد مطالعه تعیین شود. همچنین رژیم باد و پدیده‌های محلی از قبیل باد شمال (Shamal Wind) تابستانی، باد شمال زمستانی و سامانه گردش محلی نسیم دریا - خشکی (Sea and Land Breeze) مطالعه شود.



شکل ۸. گلباد (راست) و میدان باد برداری سطح (چپ) برای تاریخ شروع، ۲۰۱۴/۰۱/۰۶ و پایان، ۲۰۱۴/۰۱/۰۷ شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT.



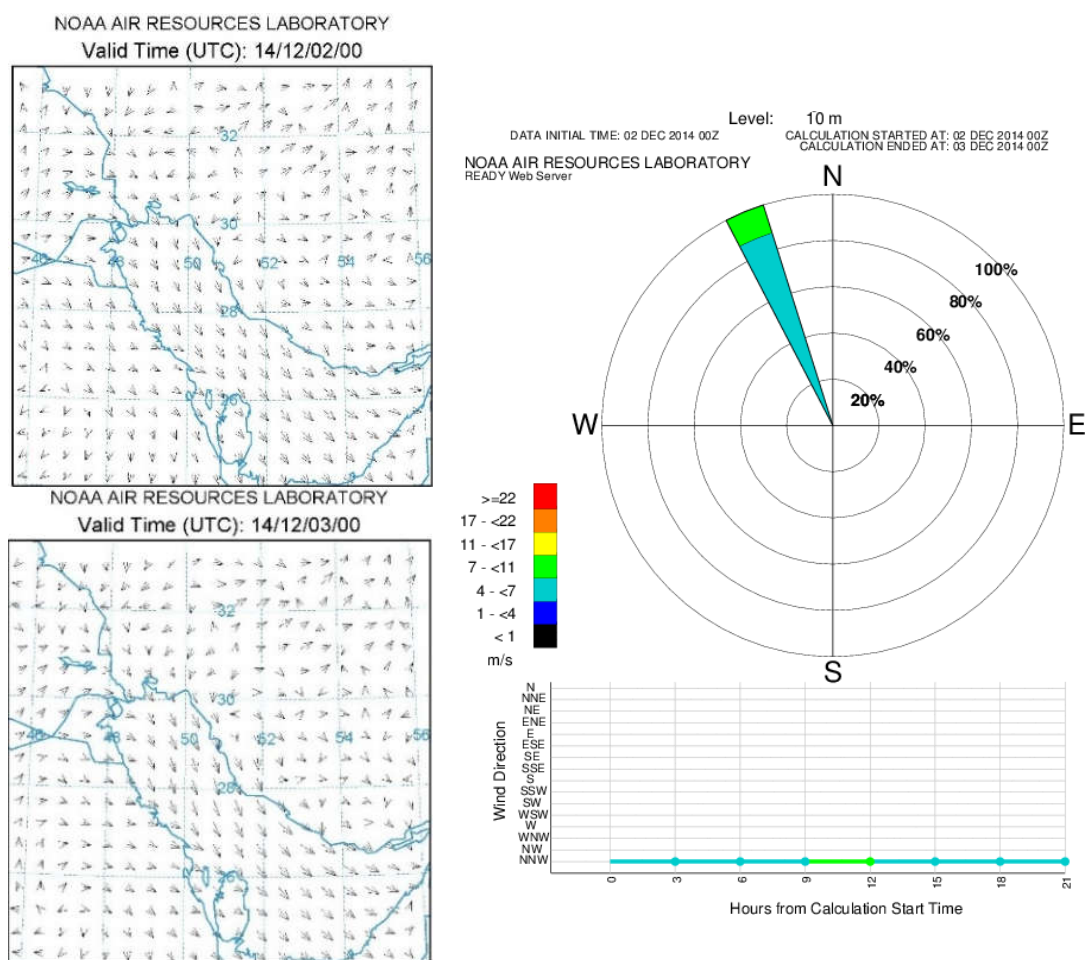
شکل ۹. توزیع مکانی ذرات شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای ساعات‌های مختلف بعد از رهاسازی تاریخ ۲۰۱۴/۰۱/۰۶ (الف) ساعت ۹، (ب) ساعت ۱۸، (ج) ساعت ۲۴، (د) برش قائم بلوم در راستای طول و عرض جغرافیایی.

کارکرد عادی نیروگاه بوشهر و برای تاریخ‌های منتخب، محاسبه شده است. در اینجا نیز برای اختصار و نبود فضای کافی برای نمایش تمامی شبیه‌سازی‌ها به ارائه ۴ مورد شبیه‌سازی اکتفا می‌شود. در شکل‌های ۱۶الف تا

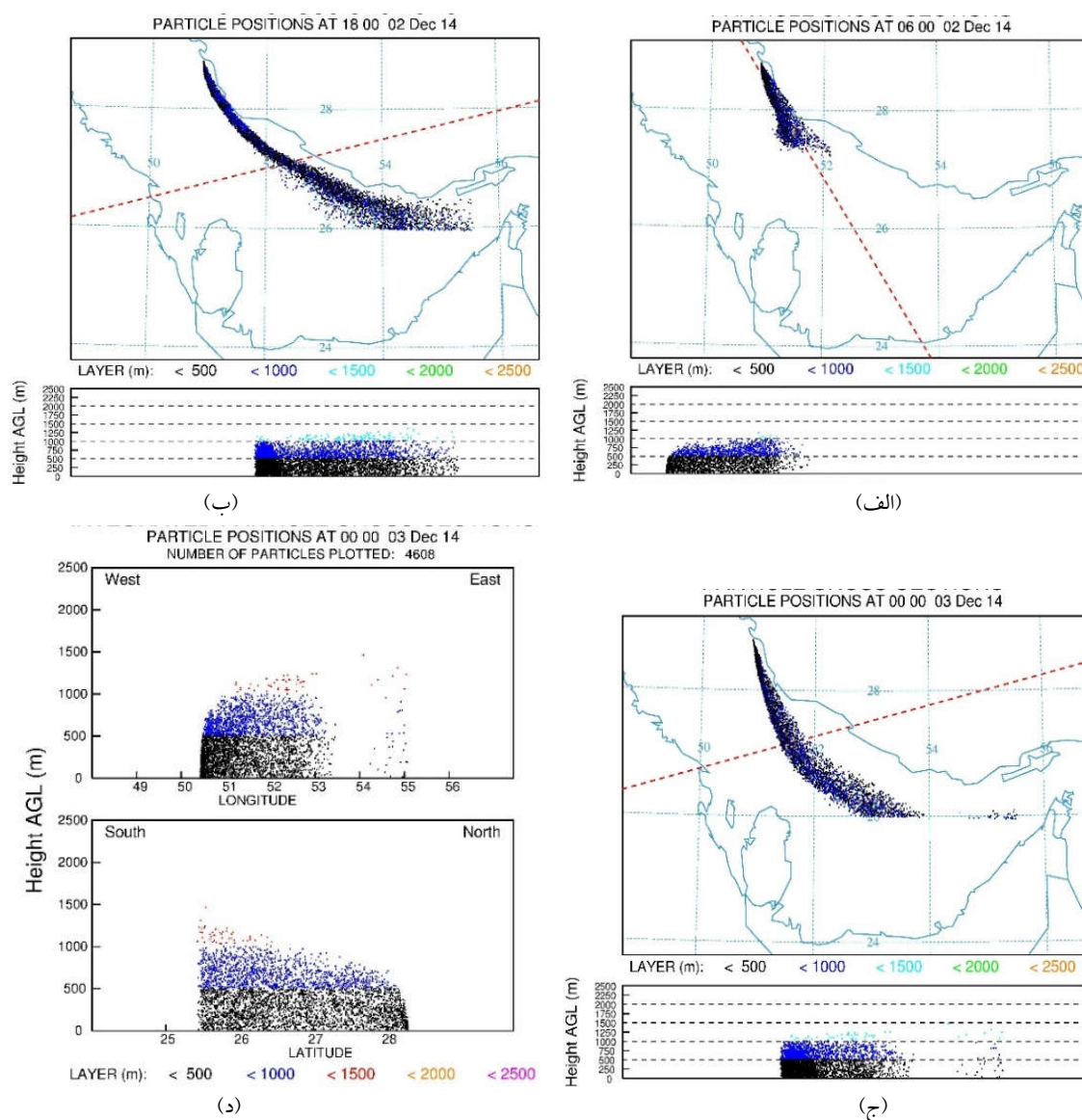
۱-۴ ارزیابی دز (Dose Assessment) کارکرد عادی نیروگاه بوشهر با مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT به‌وسیله شبیه‌سازی‌های مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT، دز مؤثر گروه سنی بزرگسال برای شرایط

نتایج در جدول ۱۲ ارائه شده است. شکل ۱۷ نمودار درصد نسبت دز محاسبه شده به مقدار حد ذر را نشان می‌دهد. همچنان که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه درصد این نسبت کمتر از ۰/۲ درصد ($< 0.2\%$) می‌باشد، و نشان می‌دهد که میزان پرتوگیری سالیانه مردم برای کارکرد عادی نیروگاه ناچیز بوده و بسیار پایین‌تر از حد قانونی اعلام شده می‌باشد.

۱۶، الگوی توزیع جغرافیایی دز معادل مؤثر روزانه (برای ۲۴ ساعت شبیه‌سازی) و برای تاریخ‌های منتخب نشان داده شده است. لازم به ذکر است که دز برآورد شده برابر مجموع پرتوگیری از پلوم، سطح زمین و استنشاق می‌باشد. همچنین با استفاده از دز مؤثر بیشینه روزانه مقادیر دز مؤثر سالیانه محاسبه و نتایج به‌دست‌آمده با مقدار حد دز سالیانه برای شرایط کار عادی نیروگاه ($Dose_{Limit} = 10^{-4}$ Sv) مقایسه گردید و



شکل ۱۰. گلباد (راست) و میدان باد برداری سطح (چپ) برای تاریخ شروع، ۲۰۱۴/۱۲/۰۲ و پایان، ۲۰۱۴/۱۲/۰۳ شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT.

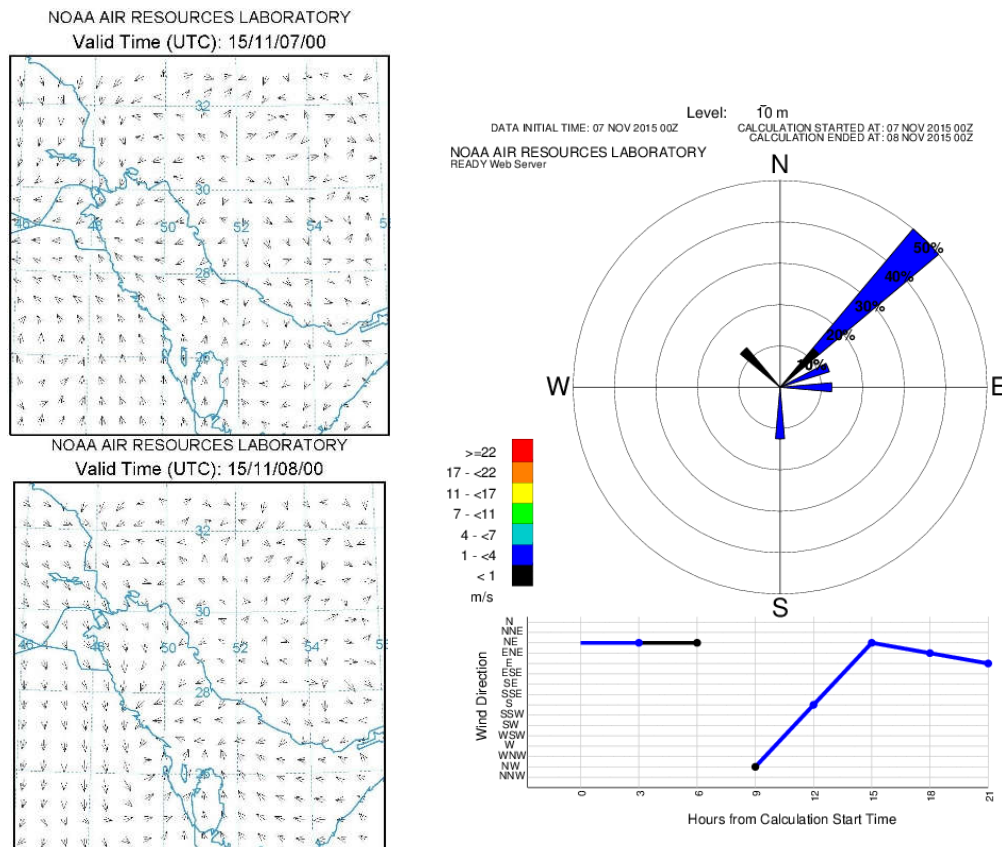


شکل ۱۱. توزیع مکانی ذرات شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای ساعات مختلف بعد از رهاسازی تاریخ ۲۰۱۴/۱۲/۰۲ (الف) ساعت ۶ (ب) ساعت ۱۸، (ج) ساعت ۲۴، (د) برش قائم پلوم در راستای طول و عرض جغرافیایی.

HYSPLIT، کارهای دیگران و گزارش‌های ایمنی و محیطی نیروگاه نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۸ نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های این مدل جفت‌شده از صحت و دقت کافی در مقایسه با کارهای دیگران و یا گزارش ایمنی و محیطی نیروگاه برخوردار می‌باشد. اهمیت کار حاضر زمانی بیشتر آشکار می‌شود که بدانیم این شبیه‌سازی‌ها بر مبنای خروجی‌های مدل پیش‌بینی میان‌مقیاس WRF انجام شده نه فقط استفاده از داده‌های

مقایسه نتایج پیش‌بینی‌های دز مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT با کارهای انجام شده توسط دیگران و گزارش‌های ایمنی و محیطی نیروگاه که در جدول ۱۳ ارائه شده است، نشان می‌دهد که این شبیه‌سازی‌ها با دقت بسیار مناسبی برای مقادیر دز مؤثر انجام شده است و این مدل جفت‌شده می‌تواند برای پیش‌بینی‌های پاشش و محاسبات دز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در شکل ۱۸ مقادیر دز محاسبه شده مدل جفت‌شده WRF-

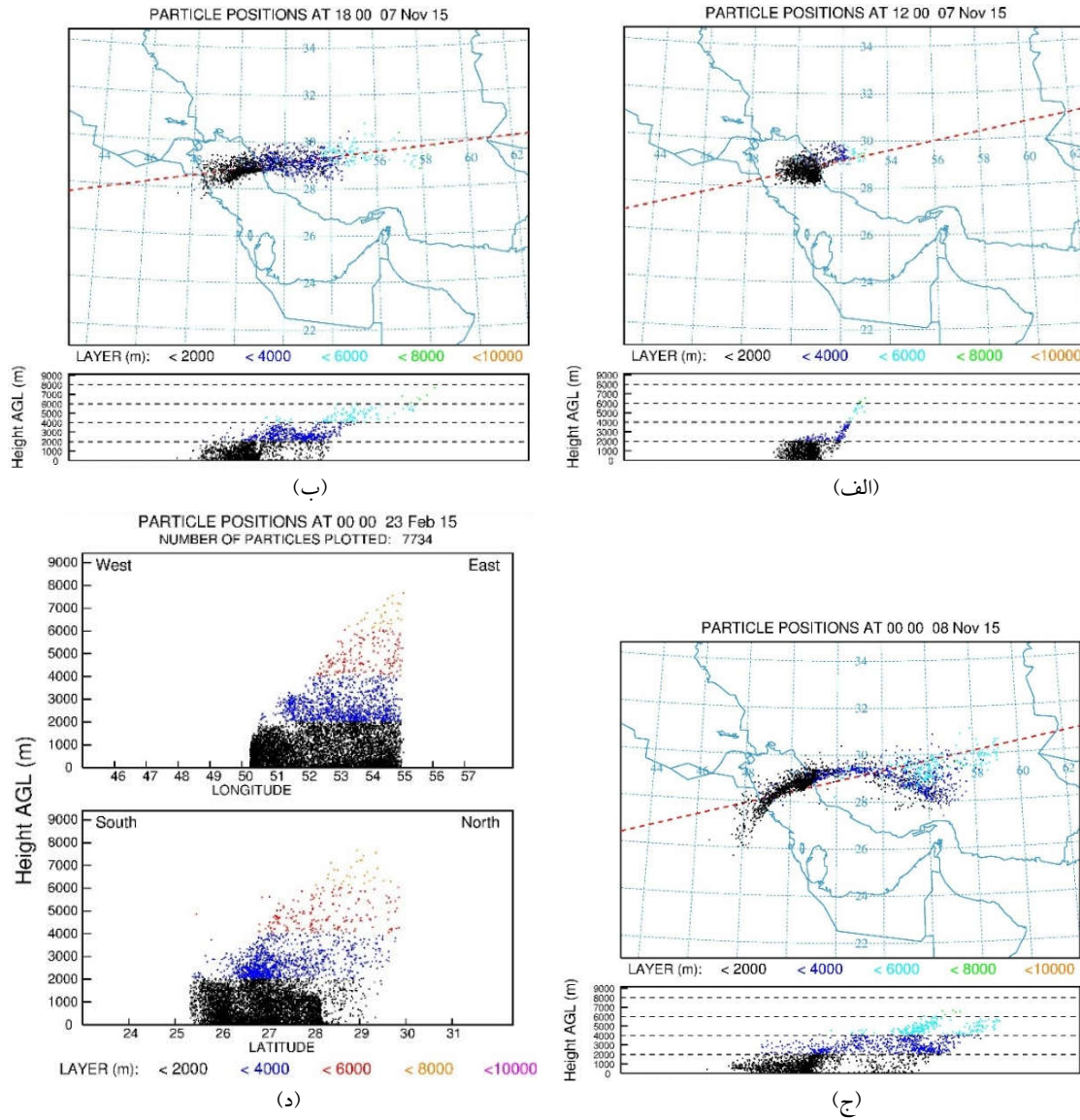
تاریخی. به عبارت دیگر این مدل جفت شده می‌تواند برای پیش‌بینی مسیر حرکت پلوم و پیامدهای پرتوی آن به خوبی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲. گلابد (راست) و میدان باد برداری سطح (چپ) برای تاریخ شروع، ۲۰۱۵/۱۱/۰۷ و پایان، ۲۰۱۵/۱۱/۰۸ شبیه‌سازی مدل جفت شده WRF-HYSPLIT.

جدول ۱۲. مقادیر دز (Sv) بیشینه روزانه و سالانه محاسبه شده با مدل جفت شده WRF-HYSPLIT و درصد نسبت آن به حد دز سالیانه $D_{limit} = 10^{-4} (Sv)$ در شرایط کار عادی نیروگاه برای تاریخ‌های منتخب.

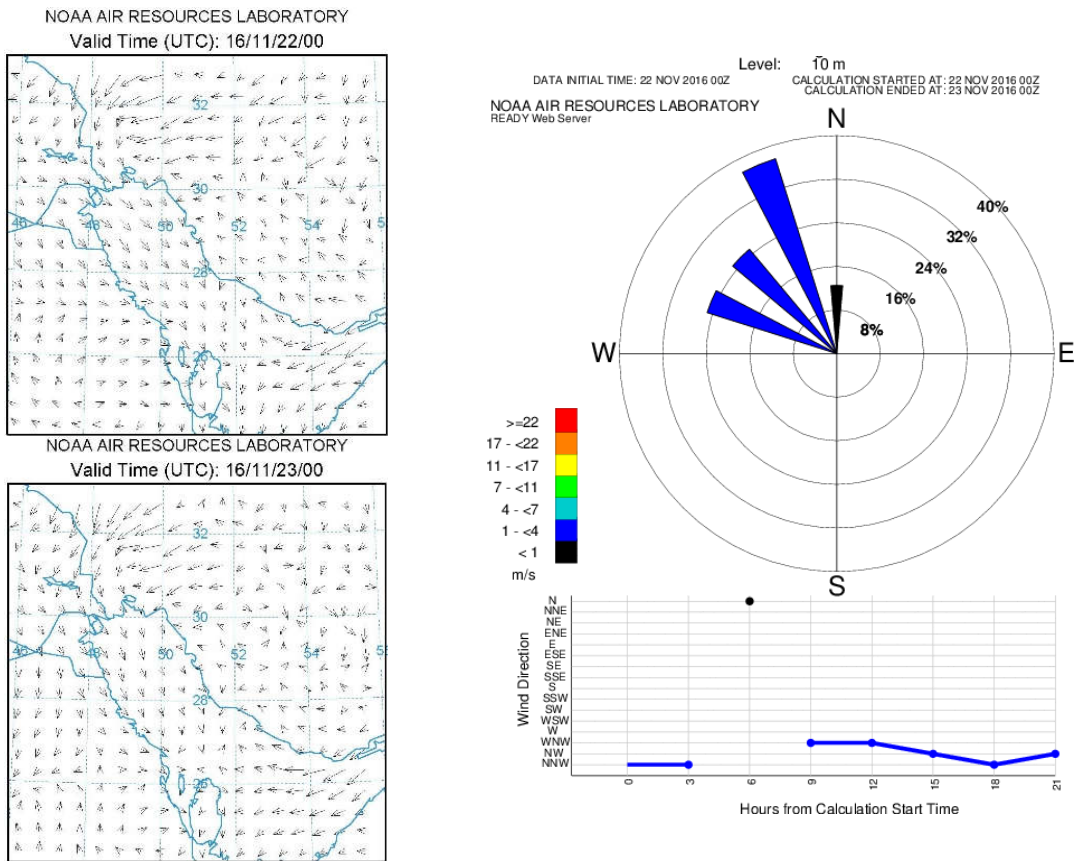
ردیف	تاریخ‌های منتخب	دز مؤثر روزانه (Sv)	دز مؤثر سالیانه (Sv)	نسبت دز محاسبه شده به حد دز سالانه (%)
۱	۲۰۱۴/۰۱/۰۶	$3/3 \times 10^{-11}$	$1/2 \times 10^{-8}$	۰/۰۱
۲	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	$2/5 \times 10^{-10}$	$9/1 \times 10^{-8}$	۰/۰۹
۳	۲۰۱۴/۰۲/۱۲	$1/6 \times 10^{-10}$	$5/8 \times 10^{-8}$	۰/۰۶
۴	۲۰۱۵/۰۲/۲۲	$8/2 \times 10^{-11}$	$3/0 \times 10^{-8}$	۰/۰۳
۵	۲۰۱۵/۱۱/۰۷	$3/2 \times 10^{-10}$	$1/2 \times 10^{-7}$	۰/۱۲
۶	۲۰۱۵/۱۲/۲۴	$1/4 \times 10^{-10}$	$5/1 \times 10^{-8}$	۰/۰۵
۷	۲۰۱۶/۰۲/۰۱	$6/8 \times 10^{-11}$	$2/5 \times 10^{-8}$	۰/۰۳
۸	۲۰۱۶/۰۸/۰۴	$5/1 \times 10^{-10}$	$1/9 \times 10^{-7}$	۰/۱۹
۹	۲۰۱۶/۱۱/۲۲	$3/3 \times 10^{-10}$	$1/2 \times 10^{-7}$	۰/۱۲
	میانگین	$2/1 \times 10^{-10}$	$7/7 \times 10^{-8}$	۰/۰۸



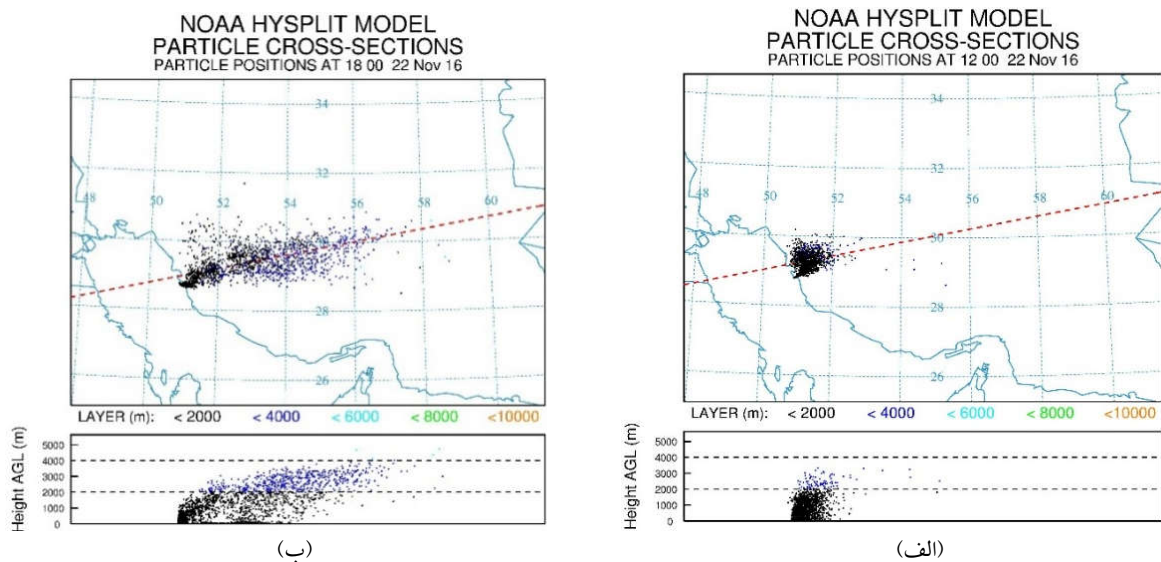
شکل ۱۳. توزیع مکانی ذرات شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای ساعت‌های مختلف بعد از رهاسازی تاریخ ۲۰۱۵/۱۱/۰۷ (الف) ساعت ۱۲، (ب) ساعت ۱۸، (ج) ساعت ۲۴، (د) برش قائم پلوم در راستای طول و عرض جغرافیایی.

جدول ۱۳. دز مؤثر سالانه بیشینه، گروه سنی بزرگسال (Sv/yr): گزارش‌های ER و FSAR، سهرابی و همکاران (۲۰۱۳)، زالی و همکاران (۲۰۱۷) و کار حاضر.

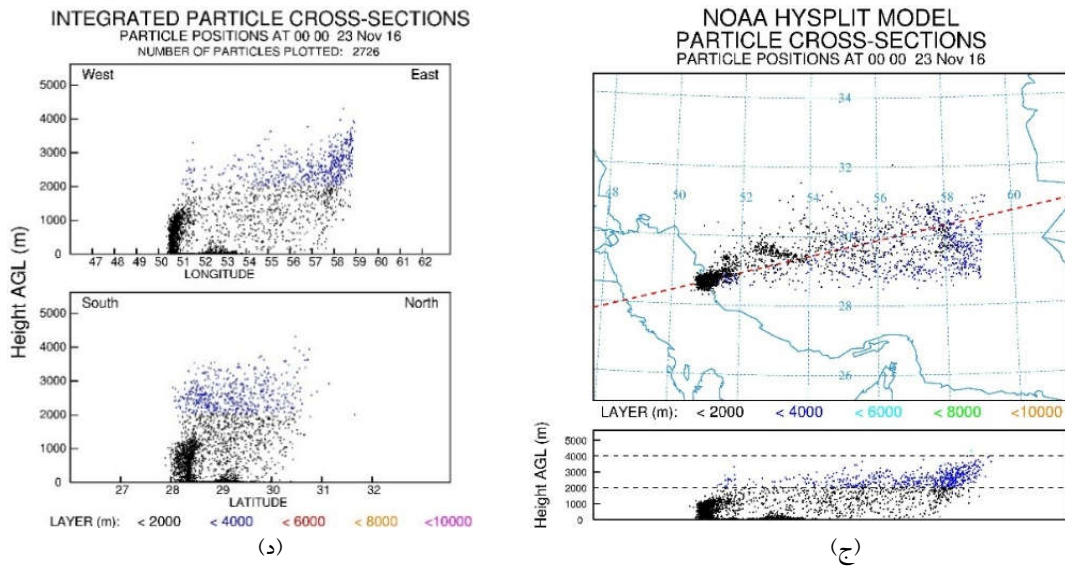
		WRF-HYSPLIT							
		(۲۰۱۴)	(۲۰۱۵)	(۲۰۱۶)	گزارش، FSAR (۲۰۱۵)	گزارش، ER (۲۰۱۳)	گزارش، ER (۲۰۰۳)	زالی و همکاران (۲۰۱۷)	سهرابی و همکاران (۲۰۱۳)
		$5/4 \times 10^{-8}$	$6/7 \times 10^{-8}$	$1/1 \times 10^{-7}$	$7/7 \times 10^{-8}$	$5/1 \times 10^{-8}$	$1/6 \times 10^{-7}$	$3/8 \times 10^{-8}$	$1/3 \times 10^{-7}$



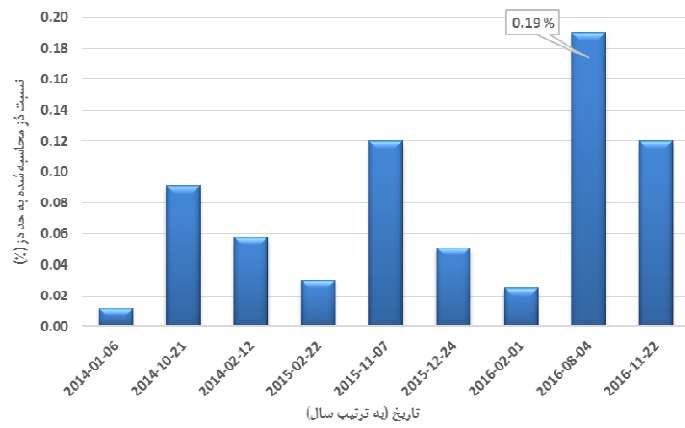
شکل ۱۴. گلباد (راست) و میدان باد برداری سطح (چپ) برای تاریخ شروع، ۲۰۱۶/۱۱/۲۲ و پایان، ۲۰۱۶/۱۱/۲۳ شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT.



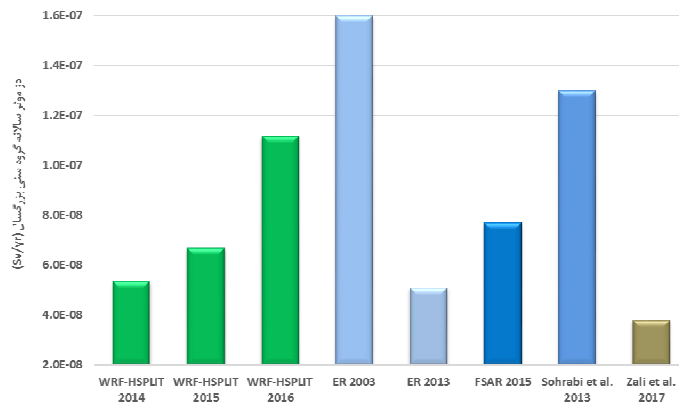
شکل ۱۵. توزیع مکانی ذرات شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای ساعت‌های مختلف بعد از رهاسازی تاریخ ۲۰۱۶/۱۱/۲۲ (الف) ساعت ۱۲، (ب) ساعت ۱۸، (ج) ساعت ۲۴، (د) برش قائم پلوم در راستای طول و عرض جغرافیایی.



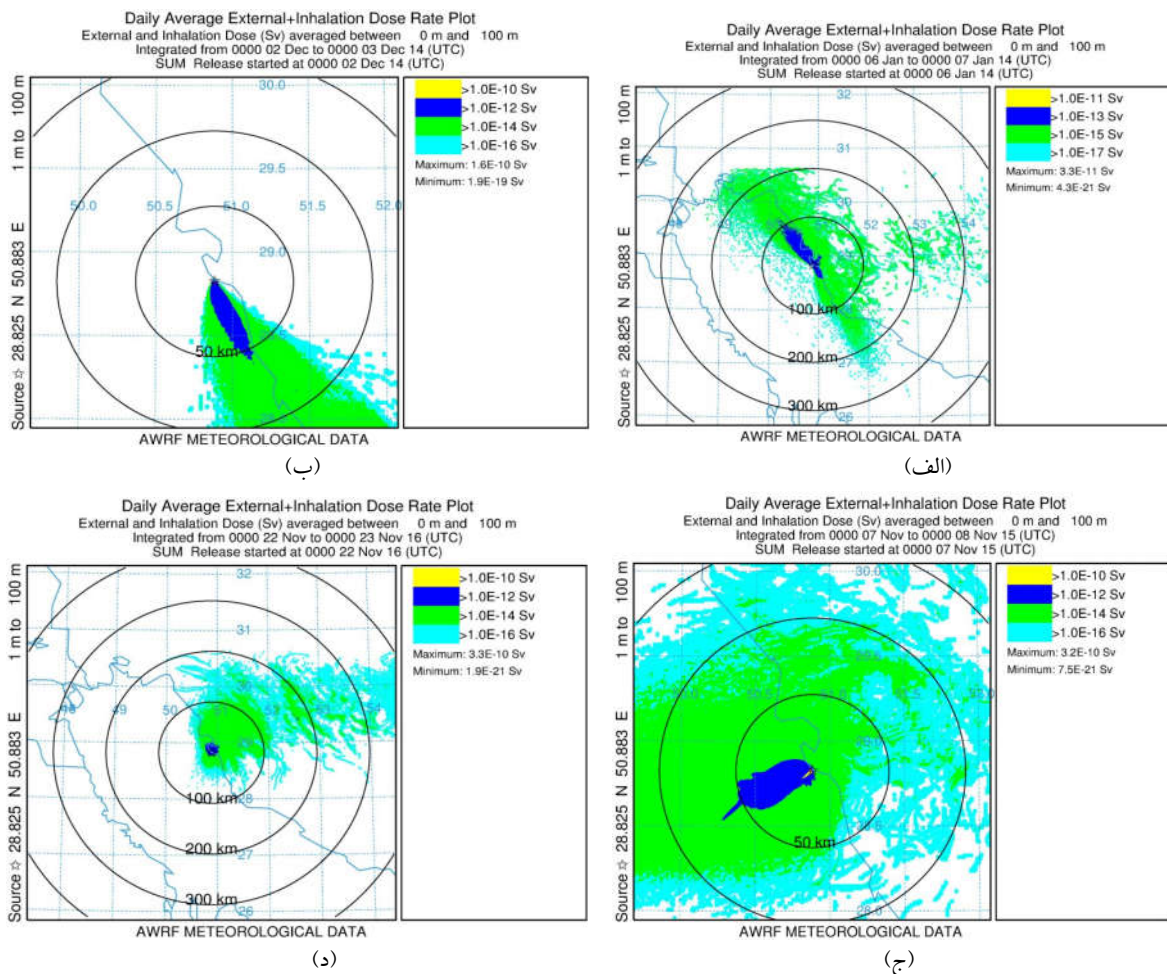
ادامه شکل ۱۵.



شکل ۱۷. نمودار نسبت دز پیش‌بینی شده توسط مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT به حد دز.



شکل ۱۸. نمودار دز معادل مؤثر بیشینه سالیانه گروه سنی بزرگسال (Sv/yr): مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی، گزارش ER 2003, 2010، سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) و زالی و همکاران (۲۰۱۷).



شکل ۱۶. الگوی توزیع مکانی دز مؤثر روزانه (Sv) شبیه‌سازی شده با مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شبیه‌سازی مدل جفت‌شده هواشناسی-پاشش (WRF-HYSPLIT)، به‌عنوان ابزاری کاربردی در ارزیابی پاشش جوئی نیروگاه بوشهر و پیش‌بینی و محاسبات پرتوگیری (Dose Calculations) برای شرایط کار عادی نیروگاه بوشهر (Normal Operation) پرداخته شد. به‌عبارت‌دیگر، هدف این مطالعه، استفاده از پیش‌بینی‌های مدل WRF به‌عنوان ورودی مدل پاشش HYSPLIT، و انجام شبیه‌سازی الگوی پاشش و محاسبات دز معادل بوده است. برای این منظور، نخست مناسب‌ترین پیکربندی مدل WRF از بین هشت طرحواره پارامترسازی فیزیک مختلف (همرفت

کومه‌ای، خردفیزیک ابر، لایه‌مرزی، لایه سطحی، تابش طول‌موج بلند، تابش طول‌موج کوتاه و سطح زمین) انتخاب شد که روش و نتایج آن تشریح شد. در ادامه اعتبارسنجی مدل پاشش HYSPLIT با استفاده از داده‌های مشاهدات بلندمدت دکل هواشناسی نیروگاه برای سال ۲۰۱۰ انجام و ارزیابی پرتوگیری (دز) با این مدل انجام گردید و نتایج حاصل با گزارش‌های ER و FSAR گروه سنی بزرگسال برای اعتبارسنجی مدل پاشش (Sv) $10^{-7} \times 2/1$ حاصل شد و در گزارش FSAR نیروگاه (Sv) $10^{-8} \times 7/7$ برآورد شده است؛ بنابراین انجام اعتبارسنجی مدل پاشش HYSPLIT نشان داد که این مدل برای

غیره) بسیار ضروری است. به‌هرحال کار حاضر با رویکرد ارائه چنین مدلی برای استفاده در شرایط کارکرد عادی و اضطرابی نیروگاه به انجام رسید.

قدردانی

نویسندگان از مساعدت مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (سامانه پارسی پیش‌بینی‌های جوی و اقیانوسی، pmetocean.ut.ac.ir) برای سامانه پردازش موازی جهت انجام اجراهای مدل WRF، مدیرعامل و معاون محترم فنی‌مهندسی شرکت تولید و توسعه، رئیس محترم آزمایشگاه محیطی نیروگاه بوشهر برای تأمین داده‌های جوئی و دز محیطی و همکاری دکتر حق‌شناس، مهندس لایقی، مهندس متانی، مهندس اسماعیلی و مهندس فولادوند و سرکار خانم دکتر قاسمی تشکر می‌نمایند.

مراجع

بیدختی، ع.، و مردادی، م.، ۱۳۸۴، مطالعه مشاهداتی روی نسیم دریا در منطقه بوشهر: مجله علمی پژوهشی دیوار، ۳۰(۵۶-۵۷)، ۷-۳۱.

جعفری بهبهانی، ت.، و کاشفی، ک.، ۱۳۸۶، بررسی دقت مدل‌های گوسی و مطالعه حساسیت آنها در پیش‌بینی آلودگی هوا: مجله پژوهش نفت، ۱۷(۵۶)، ۶۴-۷۱.

فیضی‌نژاد، م.، و خاموشی، س.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی پخش جوی در نیروگاه هسته‌ای بوشهر: مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۳۱، ۳۵-۴۲.

قادر، س.، یازجی، د.، سلطانی‌پور، م.، و نعمتی، م. ح.، ۱۳۹۴، به‌کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس: مجله هیدروفیزیک، ۱، ۴۱-۵۴.

شبیه‌سازی پاشش و محاسبات دز نیروگاه نتایج معتبر و بسیار قابل‌توجهی را ارائه می‌دهد. در ادامه نتایج اعتبارسنجی با کارهای دیگران (سهرابی و دیگران، ۲۰۱۳؛ زالی و همکاران، ۲۰۱۷) مقایسه و در جدول ۷ ارائه شد.

بعد از اعتبارسنجی مدل، شبیه‌سازی‌های پخش و انتشار با استفاده از مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT انجام شد. برای این منظور ۲۰ تاریخ از دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ میلادی، برای زمان بیشینه مشاهدات شبکه دز محیطی نیروگاه انتخاب گردید. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با این مدل جفت‌شده برای برخی تاریخ‌های منتخب در شکل‌های ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ ارائه شد. پیش‌بینی و الگوی دز برای تاریخ‌های منتخب با مدل جفت‌شده هواشناسی- پاشش برای شرایط کارکرد عادی نیروگاه انجام و در شکل‌های ۱۶(الف) تا ۱۶(د) ارائه شد. در این مورد نسبت بیشینه دز شبیه‌سازی‌شده به مقدار حد دز (شرایط کار عادی نیروگاه) برآورد و در جدول ۱۲ ذکر گردید. نمودار این نسبت در شکل ۱۷ نشان داد که بیشینه مقدار درصد نسبت دز شبیه‌سازی به حد دز ۰/۱۹٪ است (کمتر از ۰/۲٪)؛ بنابراین شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT که ترکیبی از مدل هواشناسی WRF به‌عنوان تأمین‌کننده داده‌های هواشناسی برای مدل پاشش HYSPLIT می‌باشد نشان داد که این مدل جفت‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی پاشش و محاسبات پرتوگیری نیروگاه بوشهر برای کارکرد عادی آن در حوزه‌های میان‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس مورد استفاده قرار گیرد.

از نتایج مهم پژوهش انجام شده در کار حاضر، استفاده از نتایج شبیه‌سازی مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای تأمین اطلاعات مورد نیاز مدیریت شرایط اضطرابی می‌باشد، زیرا پیش‌بینی حرکت پلوم رادیواکتیو در ساعات اولیه حادثه و محاسبات پرتوگیری در این زمان‌ها برای ارائه اقدامات مقابله (پناه‌دهی، تخلیه و

- AEOI, Atomic Energy Organization of Iran, 2015, Final Safety Analysis Report of BNPP-1.
- Borge, R., Vassil, A., Del Vas, J. J., Julio, L., and Encarnacion, R., 2008, A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian peninsula: *Atmos. Environ.* **42**, 8560-8574.
- Carrascal, M. D., Puigcerver, M., and Puig, P., 1993, Sensitivity of Gaussian plume model to dispersion specifications: Theoretical and Applied Climatology, **48**, 147-157.
- Challa, V. S., Indrcanti, J., Baham, J. M., Patrick C., Rabarison, M. K., Young J. H., Hughes R., Swanier, S. J., Hardy, M. G., and Yerramilli, A., 2008, Sensitivity of atmospheric dispersion simulations by HYSPLIT to the meteorological predictions from a meso-scale model: *Environmental Fluid Mechanics*, **8**, 367-387.
- Draxler, R. R., Jean M., Hicks B., and Randerson D., 1997, Emergency preparedness-regional specialised meteorological centres at washington and montreal: *Radiation Protection Dosimetry*, **73**(1-4), 27-30.
- Draxler, R. R. 1996, Trajectory optimization for balloon flight planning: *Weather and Forecasting*, **11**, 111-114.
- Draxler, R.R., 1999, HYSPLIT4 user's guide: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum, ERL ARL-230.
- Draxler, R. R., 2006, The use of global and mesoscale meteorological model data to predict the transport and dispersion of tracer plumes over washington, D. C.: *Weather and Forecasting*, **21**(3), 383-394.
- Draxler, R. R., and Hess, G. D., 1997, Description of the HYSPLIT_4 modeling system: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum, ERL ARL-224, 24 pp.
- Draxler, R. R., and Hess, G. D., 1998, An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition: *Australian Meteorological Magazine*, **47**, 295-308.
- Draxler, R. R., and Hess, G. D., 2004, Description of the HYSPLIT_4 modeling system: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum, ERL ARL-224, 25 pp.
- DuVivier, A., and Cassano, J., 2013, Evaluation of WRF model resolution on simulated mesoscale winds and surface fluxes near قصابی، ز، کمالی، غ، مشکوتی، ا. ح.، حجام، ح، و جواهری، ن، ۱۳۹۳، ارزیابی عملکرد طرحواره‌های پارامترسازی خرد فیزیکی و همرفت مدل WRF در برآورد بارش در حوضه آبریز کارون در جنوب غرب ایران: نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، **۱۹**(۵)-۲۰، ۱-۱۰.
- کمیحانی، ف، نصراللهی، ع، نظری، ن، و ناهید، ش، ۱۳۹۳، تحلیل رژیم باد خلیج فارس با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی: مجله علمی پژوهش نیوار، **۸۴-۸۵**، ۲۷-۴۴.
- لایقی، ب، قادر، س، بیدختی، ع، و آزادی، م، ۱۳۹۶، حساسیت‌سنجی شبیه‌سازی‌های مدل WRF به پارامترسازی‌های فیزیکی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی: مجله ژئوفیزیک ایران، **۱۱**(۱)، ۱-۱۹.
- ملکوتی، ح، پاخیزه‌زن، م، و حسینی، و، ۱۳۹۵، رفتار مشاهداتی و همدیدی باد شمال در سواحل شمال غرب خلیج فارس-بوشهر ایران (۲۰۱۰): مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، **۴۸**(۱)، ۱۵۹-۱۷۴.
- ملکوتی، ح، و علی‌محمدی، م، ۱۳۹۳، مطالعه حساسیت شدت و مسیر توفان گونو به پارامترسازی‌های شارهای سطحی مدل Advanced Hurricane WRF: مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، **۹**، ۹۷-۱۱۲.
- ملکوتی، ح، و فیضی‌نژاد، م، ۱۳۸۳، مدل‌سازی بلندمدت پخش آلاینده‌ها ناشی از رهاسازی رادیونوکلئیدها از واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر: دومین کنفرانس بین‌المللی هسته‌ای ایران، شیراز، ۸ تا ۱۱ اردیبهشت.
- AEOI, Atomic Energy Organization of Iran, 2003, Bushehr Nuclear Power Plant: Environmental Report (ER).
- AEOI, Atomic Energy Organization of Iran, 2013, Bushehr Nuclear Power Plant: Environmental Report-2 (ER2).

- predictions as a function of three atmospheric stability classification calculations: *Health Physics*, **39** (November), 773-782.
- O'Neill, L., Esbensen, S., Thum, N., Samelson, R., and Chelton, D., 2010, Dynamical analysis of the boundary layer and surface wind responses to mesoscale SST perturbations: *Journal of Climate*, **23**(3), 559-581.
- Pashazadeh, A. M., Aghajani, M., Nabipour, I., and Assadi, M., 2014, Annual effective does from environmental gamma radiation in Bushehr city: *Journal of Environmental Health Sciences and Engineering*, **12**(4), 2-4.
- Pasquill, F. and Smith, F. B., 1983. *Atmospheric Diffusion*: 3rd ed., (Wiley, New York, 1983) p. 437.
- Pasquill, F., 1971, Atmospheric dispersion of pollution: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **97**, 369.
- Perlin, N., De Szoek, S., Chelton, D., Samelson, R., Skillingstad, E., and O'Neill, L., 2014, Modeling the atmospheric boundary layer wind response to mesoscale sea surface temperature perturbations: *Monthly Weather Review*, **142**(11), 4284-4307.
- Pirouzmand, A., Dehghani, P., Hadad, K., and Nematollahi, M., 2015, Dose assessment of radionuclides dispersion from Bushehr nuclear power plant stack under normal operation and accident: *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-8.
- Raisali, G., Davilu, H., Haghhighishad, A., Khodadadi, R. and Sabet, M., 2006, Calculation of total effective dose equivalent and collective dose in the event of a loca in Bushehr nuclear power plant: *Radiation Protection Dosimetry*, **121**(4), 382-390.
- Reid, S. J., and Turner, R., 2001, Correlation of real and model wind speeds in different terrains: *Weather and Forecasting*, **16**, 620-627.
- Schnelle, K. B., and Dey, P. R., 1999, *Atmospheric dispersion modelling compliance guide*: McGraw-Hill, Europe.
- Shrivastava, R., Dash, S. K., Oza, R. B., and Hegde, M. N., 2015, Evaluation of parameterization schemes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model: A case study for the Kaiga nuclear power plant site: *Annals of Nuclear Energy*, **75**, 693-702.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, Greenland: *Monthly Weather Review*, **141**(3), 941-63.
- EC, European Communities, 2002, *Guidance on the Realistic Assessment of Radiation Doses to Members of the Public due to the Operation of Nuclear Installations under Normal Conditions*: Luxembourg.
- Evans, J. P., Ekstrom, M., and Fei, J., 2011. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over south-east Australia: *Climate Dynamics*, **39**, 1241-1258.
- Ghader, S., Montazeri-Namin, M., Chegini, F., and Bohloulou, A., 2014, Hindcast of surface wind field over the Caspian sea using WRF model: proceedings of the 11 th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2014), Tehran, Iran.
- Housiadas, C., 1999, Cm-Hysplit a software capability for response in nuclear emergencies, National Centre for Scientific Research "Demokritos": Institute of Nuclear Technology and Radiation Protection, Technical Report, 11 pp.
- Hurley, P. J., 1994, PARTPUFF, a Lagrangian particle/puff approach for plume dispersion modelling applications: *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 285-294.
- IAEA, 1980, *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting*: Vienna.
- IAEA, 2001, *Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment*: Vienna.
- ICRP, 1991, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* **21** (1-3).
- ICRP, 1995, *Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients*: ICRP Publication 72. *Ann. ICRP* **26** (1), ICRP Publication 72.
- INRA, Iranian Nuclear Regulatory Authority, 2008, *Radiation protection criteria for Bushehr nuclear power plant (BNPP-1)*: Tehran, Iran.
- Jasiulionis, R., and Rozkov A., 2006, Radionuclides in deposition in the Ignalina npp region in 2005, Central European: *Journal of Physics*, **4**(4), 417-428.
- Kreyszig, E., 2006, *Advanced engineering mathematics*: 9th Ed., J. Wiley and Sons, 1245 pp.
- Miller, C. W., and Craig, A., 1986, *Accuracy of Gaussian plume dispersion model*

- parameters for diffusion applications: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **24**, 1196-1207.
- Vauquelin, O., and Levy, F., 2000, Evaluation of a Gaussian-modified dispersion model for atmospheric release from the Marcoule nuclear site: *Environmental Modeling and Assessment*, **5**, 75-81.
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., Beezley, J. D., Coen, J. L., and Mandel, J., 2010, User's guide for the advanced research wrf (arw) version 3.2, NCAR (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf).
- Wilks, D.S., 2011, *Statistical methods in the atmospheric sciences: 3rd Ed.*, Academic Press, 676 pp.
- Wu, Q., Wang, Z., Chen, H., Zhou, W., and Wenig, M., 2012, An evaluation of air quality modeling over the Pearl River Delta during November 2006: *Meteorology and Atmospheric Physics*, **116**, 113-132.
- Xu, H., Xu, M., Xie, S. P., and Wang, Y., 2011, Deep atmospheric response to the spring kuroshio over the east china sea: *Journal of Climate*, **24**(18), 4959-4972.
- Zali, A., Shamsaei Zafarghandi, M., Fegghi, S. A., and Taherian, A. M., 2017, Public member dose assessment of Bushehr Nuclear Power Plant under normal operation by modeling the fallout from stack using the HYSPLIT atmospheric dispersion model: *Journal of Environmental Radioactivity*, **171**, 1-8.
- Zhang, D., and Zheng, W., 2004, Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations: *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 157-169.
- X., Wang, W., and Powers, J., 2008, A description of the advanced research wrf version 3, NCAR/TN-475+STR.
- Sohrabi, M., Ghasemi, M., Amrollahi, R., Khamooshy, C., and Parsouzi, Z., 2013, Assessment of environmental public exposure from a hypothetical nuclear accident for Unit-1 Bushehr nuclear power: *Radiation and Environmental Biophysics*, **52**, 235-244.
- Sohrabi, M., Parsouzi, Z., Amrollahi, R., Khamooshy, C., and Ghasemi, M., 2013, Public exposure from environmental release of radioactive material under normal operation of unit-1 Bushehr nuclear power plant: *Annals of Nuclear Energy*, **55**, 351-358.
- Srinivas, C. V., Venkatesan, R., Baskaran, R., Rajagopal, V., and Venkatraman, B., 2013, Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor: *Annals of Nuclear Energy*, **55**, 351-358.
- Sutton, O. G., 1947, The theoretical distribution of airborne pollution from factory chimneys.
- Thom, H. C. S., 1966, Some methods of climatological analysis: *World Meteorological Organization Technical Notes*, **81**, 53 pp.
- Tinker, R., Orr, B., Grzechnik, M., Hoffmann, E., Saey, P., and Solomon, S., 2010, Evaluation of radionuclide releases in Australia using atmospheric dispersion modelling tools: *Journal of Environmental Radioactivity*, **101**, 353-361.
- UNSCEAR, 2000, Report to the general assembly. Annex B: exposures from natural radiation sources.
- Van Ulden, A. P., and Holtslag, A., 1985, Estimation of atmospheric boundary layer

Simulation of atmospheric dispersion and dose assessment by a coupled WRF-HYSPLIT model for Bushehr power plant

Masoud Feyzinejad¹, Hossain Malakooti², Masoud Sadrinasab³, Sarmad Ghader^{4*}, and Daniel Yazgi⁵

¹Ph. D. student, Hormozgan University, Hormozgan, Iran

²Assistant Professor, Faculty of Marine Sciences and Technologies, Hormozgan University, Hormozgan, Iran

³Associate Professor, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁵Ph. D. student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 24 June 2017, Accepted: 22 August 2017)

Summary

The simulation and prediction of pollutants dispersion entering into the atmosphere (such as material releases from the chimneys of industries and power plants) are important in different views, long-term environmental monitoring and dose calculations as well as issuing an appropriate warning in the event of an accident. To this end, a system of coupled meteorology-dispersion model can be used. In fact, a numerical weather prediction model is coupled to a dispersion model. In the present work, the weather research and forecasting (WRF) model is used to provide the meteorological data for the HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) dispersion model.

Sensitivity and validation of the WRF model are conducted by utilizing different combinations of physical parameterization schemes (microphysics, longwave radiation, shortwave radiation, surface layer, land surface, boundary layer and cumulus convection) for the prediction of meteorological parameters in an area containing the Bushehr power plant. For this purpose, eight different configurations are used. Then, for several dates, sensitivity, and validation of the model results is carried out to find the proper configuration of the model. Assessment of the predictions of the WRF model is carried out by computing the statistical parameters including correlation coefficient (CC), root mean square error (RMSE), and comparing with the collected observational data (on-site the meteorological tower and Sodar system in Bushehr power plant and synoptic meteorological stations nearby).

After determining the proper configuration of the WRF model, dispersion simulations and annual effective dose for the adult age group are carried out by WRF-HYSPLIT coupled model under normal conditions for Bushehr power plant. The predicted annual effective dose for the adult age group by the coupled model for the years 2014, 2015 and 2016, provided 5.8×10^{-8} (Sv), 6.7×10^{-8} (Sv) and 1.1×10^{-7} (Sv) respectively, in return value 7.7×10^{-8} (Sv) for Bushehr power plant final safety analysis report (FSAR report). Comparing these results show that the simulation and prediction of dose by the coupled WRF-HYSPLIT model are in good agreement with observations and indicates the validity of the simulations. The ratio of predicted annual effective dose to dose limit for normal operation is obtained less than 0.2 percent (<0.2 %), which shows that public annual exposure dose for normal operation of Bushehr power plant is negligible compared to the legal limit.

The results of the present work showed that the coupled WRF-HYSPLIT model can be used as a promising tool for the prediction of dispersion and dose calculations for Bushehr power plant under normal operation. In addition, the results of this coupled model can provide the required information for emergency management to forecast the movement and direction of radioactive plume and exposure dose calculations.

Keywords: simulation, WRF, parameterization, HYSPLIT, dose calculations, Bushehr power plant

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir