

طراحی، پیاده‌سازی و راستی آزمایی کد IRPUFF برای انتشار محلی آلودگی هسته‌ای

عبدالباست آق^۱، مهدی زنگیان^{۲*} , مهدی آقایی موقانلو^۳

۱- دانشجوی ، ۲- استادیار ۳- دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، تهران ، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶)

چکیده

مسئله ایمنی یکی از اولویت‌های تحقیقات در به‌کارگیری دانش هسته‌ای است و نشت مواد رادیواکتیو در حین کارکرد عادی و یا هنگام بروز حادثه از تأسیسات هسته‌ای جزء مهم‌ترین مباحث مربوط به این حوزه محسوب می‌شود. مدل‌سازی نحوه پخش و گسترش مواد رادیواکتیو نشت کرده به جو با پیش‌بینی الگوهای پخش کمک می‌کند تا علاوه بر انتخاب محل مناسب برای احداث تأسیسات هسته‌ای در صورت بروز حادثه کمترین آسیب به محیط‌زیست و انسان وارد شود. برای مدل‌سازی نحوه پخش مواد رادیواکتیو به اطلاعات گوناگونی مانند میزان مواد آزاد شده و مشخصات آن، شرایط جوی و عوارض زمین پیرامون تأسیسات هسته‌ای نیاز است. در این پژوهش روش محاسبات، طراحی و پیاده‌سازی کد IRPUFF برای شبیه‌سازی پخش اتمسفری مواد رادیواکتیو به روش پاف، توضیح داده شده است. برای راستی آزمایی، پخش مواد در حادثه فوکوشیما مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج با کدهای مرسوم مانند CALPUFF و HYSPLIT و همچنین داده‌های محیطی مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که کد IRPUFF توانایی شبیه‌سازی نشت محیطی مواد رادیواکتیو را دارا بوده و نتایج حاصل از آن به‌خوبی با کدهای مرسوم و همچنین با داده‌های جمع‌آوری شده در شهرهای مختلف ژاپن مطابقت دارد.

کلیدواژه‌ها: پخش اتمسفری مواد رادیواکتیو، روش پاف، حادثه فوکوشیما، CALPUFF، HYSPLIT.

Designing, Implementation, and Verification of the IRPUFF Code for Local Atmospheric Dispersion of Nuclear Contamination

A. Agh, M. Zangian^{*} , M. Aghaei Moghanloo

Shahid Beheshti University

(Received: ۲۰۲۴/۰۸/۲۷, Revised: ۲۰۲۴/۰۹/۲۳, Accepted: ۲۰۲۴/۱۱/۰۶, Published: ۲۰۲۴/۱۱/۲۶)

Abstract

Safety is a key concern in nuclear energy, especially regarding the potential release of radioactive materials during normal operation or accidents. Accurately modeling their atmospheric dispersion is essential for both site selection and minimizing the impact of potential releases through effective emergency response. This modeling depends on input data such as the amount and properties of the released material, weather conditions, and local topography. In this study, the IRPUFF code was developed using the Puff method to simulate the atmospheric diffusion of radioactive materials. The workflow for data extraction and preparation for regional simulations is also outlined. For validation, the dispersion of radionuclides during the Fukushima accident was simulated, and the results were compared with those from standard models such as CALPUFF and HYSPLIT, as well as actual environmental monitoring data. The comparison shows that IRPUFF reliably models the environmental release and dispersion of radioactive materials. Its results closely match both conventional codes and observed data from various Japanese cities, demonstrating its potential for nuclear safety assessments.

Keywords: Atmospheric Radionuclide Dispersion, Puff Method, Fukushima Accident, CALPUFF, HYSPLIT.

*Corresponding Author E-mail: m_zangian@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از مطالعاتی که در هنگام انتخاب محل ساخت تأسیسات هسته‌ای صورت می‌گیرد، مطالعات مربوط به نحوه پخش مواد رادیواکتیو در صورت بروز حادثه وخیم و یا کارکرد عادی است. این اطلاعات برای تعیین شعاع‌های کنترلی اطراف نیروگاه هسته‌ای نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش هدف طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز نشت اتمسفری مواد رادیواکتیو در هنگام بروز حادثه‌ای وخیم، با توجه به شرایط جوی و عوارض زمین اطراف محل حادثه است. روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی پخش اتمسفری وجود دارد که می‌توان این روش‌ها را بر اساس مقیاس ناحیه‌ای که می‌توانند بکار برده شوند، تقسیم‌بندی کرد. اولین مدل‌سازی‌ها برای نواحی نزدیک حادثه مدل گوسی با مطالعات تورنر و بریگز در سال‌های ۱۹۶۴ تا ۱۹۶۸ توسعه داده شد [۱، ۲]. برای مدل‌سازی بازه زمانی بزرگ‌تر و همچنین نواحی پخش گسترده‌تر مدل‌های اولبری و لاگرانژی در دهه ۱۹۷۰ توسط رود و فیشر و رینولدز توسعه داده شد [۱]. مدل پاف در اواخر دهه هفتاد میلادی با تلفیق مدل گوسی و لاگرانژی توسعه پیدا کرد. از این‌رو می‌توان گفت که پایه مدل‌سازی‌های اتمسفری تا سال ۱۹۸۰ به وجود آمده و پس از آن اکثر تلاش‌ها بر روی بهبود مدل‌های موجود صورت گرفته است.

در حال حاضر نرم‌افزارهای مختلفی همانند AERMOD، HotSpot، HYSPLIT و CALPUFF برای مدل‌سازی پخش اتمسفری وجود دارند که برای شبیه‌سازی حوادث پیش‌بینی نشده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳-۵].

نرم‌افزارهای AERMOD و HotSpot که بر اساس مدل گوسی توسعه پیدا کرده‌اند، به این دلیل که تنها شبیه‌سازی را در جهت باد ثابت انجام می‌دهند، برای مدل‌سازی پخش در مناطق گسترده و ناحیه وسیع مناسب نیستند. نرم‌افزار HYSPLIT از مدل لاگرانژی استفاده می‌کند. این مدل میدان بادی سه‌بعدی را از پایگاه‌های داده موجود خود دریافت می‌کند و بر این اساس توانایی مدل‌سازی در نواحی گسترده و قاره‌ای را دارد. این مدل به دلیل تراورد ذرات در محیط، هزینه محاسباتی بالایی دارد. مدل پاف ویژگی‌های مدل گوسی و مدل لاگرانژی را در خود جای داده است. این مدل توانایی مدل‌سازی پخش آلودگی در مناطق گسترده را دارد و همچنین هزینه محاسباتی آن نسبت به مدل لاگرانژی پایین‌تر است. از این‌رو این روش برای توسعه کد پخش محیطی انتخاب شده است. نرم‌افزار CALPUFF نیز بر اساس این روش توسعه پیدا کرده است.

توسعه مدل‌های موجود و بررسی مدل‌های جدید و بهره‌گیری از اطلاعات کامل‌تر برای مدل‌سازی دقیق‌تر ضرورت توسعه نرم‌افزار بومی در این زمینه را روشن می‌سازد، علاوه بر آن

عدم دسترسی به این نرم‌افزارها و پیچیدگی بسیار زیاد در فرآیند مدل‌سازی آن‌ها و وجود پارامترهای گوناگون اهمیت آن را دوچندان می‌کند. چیدمان مطالعه پیشرو به صورت زیر است: در بخش ۲ روش‌های بکار رفته در کد IRPUFF به صورت مختصر مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳ نحوه کسب و پردازش اطلاعات هواشناسی برای ناحیه مورد نظر و تبدیل آن به فرمت مناسب برای نرم‌افزارهای مختلف آورده شده است. بخش ۴ به بررسی حادثه فوکوشیما و اطلاعات ورودی لازم برای شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد. بخش ۵ نتایج محاسبات و بخش ۶ قسمت جمع‌بندی خواهد بود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. معرفی کد IRPUFF

کد IRPUFF از روش پاف برای شبیه‌سازی روند پخش مواد رادیواکتیو در اتمسفر استفاده می‌کند. از قابلیت‌های این کد می‌توان به امکان استفاده از داده‌های هواشناسی شبکه‌بندی شده، امکان استفاده از چشمه‌های متغیر با زمان، ساخت فایل ادامه اجرا برای اجراهای متوالی و غیره اشاره کرد. الگوریتم کلی کد توسعه داده شده در شکل (۱) آورده شده است.

۲-۲. معادله حاکم بر روش پاف

مدل پاف یک توده ابری پیوسته را مانند تعدادی بسته گسسته که پاف^۱ نامیده می‌شوند، در نظر می‌گیرد و هر پاف با استفاده از مدل گوسی پراکنده می‌شود. هر پاف می‌تواند در راستای محورهای x ، y و z گسترش یابد و مرکز آن با توجه به معادله لاگرانژی حرکت داده می‌شود. شبیه‌سازی حرکت پاف‌ها در بازه‌های زمانی گسسته انجام می‌شود. در ابتدای هر بازه زمانی غلظت پاف با توجه به اطلاعات گام قبلی محاسبه شده و سپس با توجه به پارامترهای پراکنندگی (شرایط جوی و عوارض زمین) حرکت آن در طی بازه زمانی شبیه‌سازی می‌شود. مجموع مشارکت همه پاف‌ها بر روی هر گیرنده (نقطه) به عنوان غلظت ثبت شده در آن گیرنده ثبت می‌شود. غلظت ناشی از هر پاف در گیرنده بر اساس معادلات زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \hat{g} \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (1)$$

که در این معادله ضریب \hat{g} قسمت عمودی معادله بالا است که به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\hat{g} = \frac{2}{(2\pi)^{0.5} \sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

^۱ Puff

روند پخش آن را مطابق الگوریتم شکل ۱ پیگیری می‌کند. برای این منظور ابتدا عوارض زمین با توجه به محدوده شبیه‌سازی، و اطلاعات هواشناسی با توجه به محدوده مکانی و زمانی شبیه‌سازی با تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی موردنظر تولید می‌شود. سپس به ازای هر گام زمانی از شبیه‌سازی پاف‌های جدیدی با توجه به اطلاعات چشمه ایجاد و این پاف‌ها به همراه پاف‌های از قبل تولیدشده با توجه به اطلاعات هواشناسی در محل هر پاف حرکت و پخش می‌شود (مکان مرکز پاف با توجه به سرعت باد و اندازه آن با توجه به شرایط و دمای اتمسفر محاسبه می‌شود). سپس اثر پاف در هر گیرنده (ثبت‌کننده غلظت) توسط رابطه ۱ به‌صورت تجمعی ثبت می‌شود و این روند تا اتمام زمان شبیه‌سازی انجام می‌شود. در ادامه جزئیات مربوط به هر قسمت توضیح داده‌شده است.

۲-۳. کلاس‌های پایداری و پارامترهای پخش

میزان آشفتنگی اتمسفر تأثیر بسزایی روی نحوه پخش مواد در اتمسفر دارد. هرچه اتمسفر آشفته‌تر باشد میزان پخش مواد بیشتر و غلظت متناظر آن‌ها در گیرنده کمتر است. میزان آشفتنگی اتمسفری را پاسکویل در سال ۱۹۶۱ با معرفی شش کلاس پایداری به‌صورت کیفی تعریف کرد [۷]. در ادامه نیز روش‌های دقیق‌تری برای تعیین کلاس‌های پایداری معرفی شدند مانند عدد ریچاردسون [۸] و طول مونین اوباکوف [۹]. در IRPUFF کلاس پایداری با محاسبه طول مونین اوباکوف با استفاده از معادله زیر صورت گرفته است:

$$L = \frac{-\rho c_p Tu^*}{kgQ_h} \quad (۳)$$

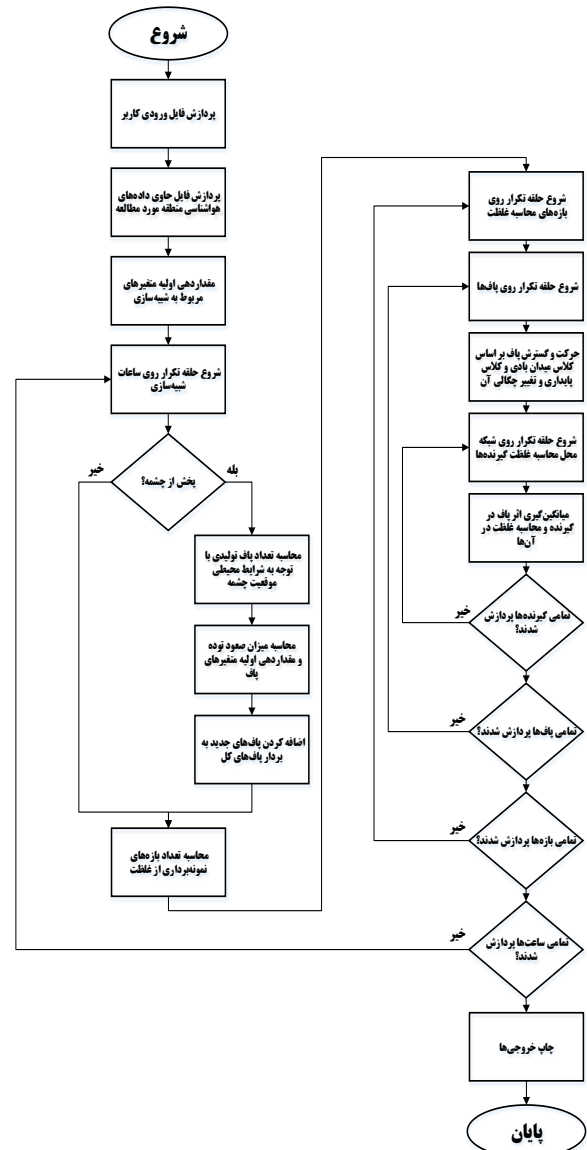
T دما برحسب کلونین (K)، c_p گرمای ویژه هوا با فشار ثابت، ρ چگالی هوا (kg m^{-3})، g شتاب گرانش (m s^{-2})، Q_h شار حرارتی محسوس، u^* سرعت اصطکاک سطحی است.

پارامترهای پخش یا همان انحراف از معیارهای معرفی‌شده در معادله (۱) و (۲) بر اساس زمان یا طول پرواز پاف و کلاس‌های پایداری محاسبه می‌شوند [۶].

۲-۴. صعود عمودی توده مواد رادیواکتیو

در لحظه انتشار به دلیل اختلاف دمای مواد منتشرشده با هوای محیط همچنین به دلیل اختلاف سرعت انتشار با سرعت باد در محیط، پاف ممکن است بلافاصله پس از منتشر شدن بدون آنکه فرصتی برای پخش پیدا کند مقداری اوج بگیرد. در IRPUFF صعود توده توسط الگوریتمی که به الگوریتم بریگز مشهور است، محاسبه‌شده است [۲]. معادلات پیاده شده این روش را می‌توان در مرجع [۶] یافت.

در این معادلات: C غلظت در گیرنده (g m^{-3})، Q جرم آلاینده (g) در پاف، و با توجه به دستگاه مختصات چسبیده به پاف (لاگرانژی) σ_x انحراف معیار (m) توزیع گوسی در جهت باد، σ_y انحراف معیار (m) توزیع گوسی در جهت متقابل، σ_z انحراف معیار (m) توزیع گوس در جهت عمودی، d_a فاصله (m) از مرکز پاف به گیرنده در جهت باد، d_c فاصله (m) از مرکز پاف به گیرنده در جهت متقابل باد، H ارتفاع مؤثر (m) بالاتر از زمین مرکز پاف و h ارتفاع لایه اختلاط (m) است.



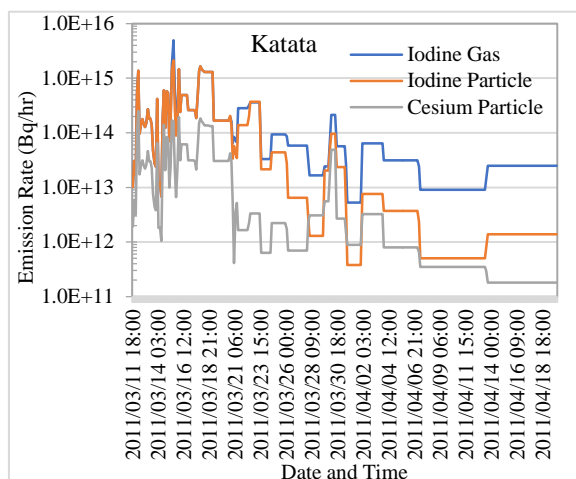
شکل ۱. الگوریتم کد IRPUFF

غلظت میانگین \bar{C} در هر گیرنده با انتگرال‌گیری از معادله بالا در طول مسیر سیر پاف، ds ، در طی مرحله نمونه‌برداری dt ، به دست می‌آید [۶].

مدل پاف یک توده پیوسته ناشی از چشمه را به‌صورت تعدادی بسته گسسته از مواد، تحت عنوان پاف در نظر می‌گیرد و

شدن سیستم‌های پشتیبان، فرآیند خنک‌سازی قلب و استخر نگهداری سوخت واحدهای مختلف با اخلاص روبه‌رو شده و سرانجام به دلیل عدم برداشت مناسب حرارت، به میله سوخت آسیب‌رسانیده و تولید هیدروژن و بخار باعث انفجار و پخش مواد رادیواکتیو در اتمسفر در چند واحد از این نیروگاه شد [۱۳].

مقادیر وابسته به زمان میزان آزادسازی مواد رادیواکتیو در طول حوادث اتمی نقش مهمی بر نحوه پخش این مواد در اتمسفر و میزان دز ناشی از آن‌ها بر روی محیط‌زیست و انسان دارد. به دلیل مشخص نبودن مقادیر دقیق وابسته به زمان مواد رادیواکتیو آزاد شده در حین حادثه از روش‌های معکوس برای تخمین این مقادیر استفاده می‌شود. در مراجع [۱۴-۱۷] می‌توان تخمین‌های مختلف از چشمه را با توجه به اطلاعات محیطی و روش‌های مختلف یافت. در این پژوهش بروزترین چشمه تخمین زده شده توسط کاتاتا [۱۵] استفاده شده است که در شکل (۳) ارائه شده است.



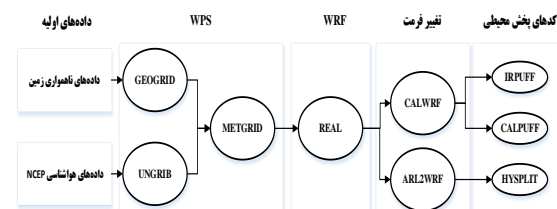
شکل ۳. چشمه تخمینی پیشنهاد شده توسط کاتاتا [۱۵] با رزولوشن سه ساعت.

ناحیه مورد مطالعه: نیروگاه دایچی در موقعیت جغرافیایی ۳۷.۴۲۰۶ و ۱۴۱.۰۳۲۹ قرار دارد. طول مدت مدل‌سازی از ساعت ۱۸ روز ۱۱ مارس تا ابتدای روز ۱۸ مارس به مدت ۱۵۲ ساعت در نظر گرفته شده است، به این دلیل که بیشترین آزادسازی مواد رادیواکتیو در این بازه اتفاق افتاده است. ناحیه مورد مطالعه، ناحیه‌ای به مرکزیت موقعیت نیروگاه با طول و عرض ۴۰۰×۴۰۰ کیلومتر با شبکه‌بندی ۱×۱ کیلومتر در نظر گرفته شده است. این ناحیه و برخی شهرهای مهم نیز در نقشه (شکل ۴) مشخص شده‌اند.

بعد از رخ دادن حادثه و نشت مواد رادیواکتیو در اتمسفر، مقدار رادیواکتیویته محیط در شهرهای ژاپن اندازه‌گیری شد. یکی از سازمان‌ها که این مشاهدات محیطی را سازمان‌دهی کرده است وزارت آموزش، فرهنگ، ورزش، علم و فناوری ژاپن

۲-۵. اطلاعات هواشناسی و پردازش آن‌ها

داده‌های هواشناسی و ناهمواری‌های سطحی نقش مهمی در الگوی پخش مواد نشت کرده در اتمسفر دارد. در پایگاه داده‌ی برخی نرم‌افزارها این اطلاعات موجود می‌باشند. برای مثال پایگاه داده نرم‌افزار HYSPLIT داده‌های جهانی را با فرمت GDAS برای بازه‌های زمانی مختلف دارا است، اما این پایگاه‌های داده برای همه‌ی کاربردها مناسب نیست و در مواردی که نیاز به رزولوشن بیشتری برای ناحیه مطالعاتی خاص وجود دارد، نمی‌توانند نیاز کاربر را تأمین کند. از این رو دقت محاسبات انجام شده کاهش می‌یابد. در این پژوهش از مدل تحقیق و پیش‌بینی آب‌وهوا (WRF) که یک سیستم پیش‌بینی عددی برای تحقیقات اتمسفر و برنامه‌های کاربردی پیش‌بینی‌های عملیاتی است، استفاده شده است. WRF می‌تواند شبیه‌سازی‌ها را بر اساس شرایط واقعی جو (به‌عنوان مثال از مشاهدات و تجزیه و تحلیل‌ها) همچنین در شرایط ایدئال فرضی انجام دهد. اطلاعات اولیه از شبکه هواشناسی جهانی NCEP [۱۰] که دارای اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی اتمسفری است استخراج شده است. WRF داده‌های شبکه‌بندی شده در ناحیه موردنظر را رزولوشن دلخواه را با استفاده از روش رانگ‌کوتا تولید می‌کند [۱۱، ۱۲]. خروجی به‌دست‌آمده از WRF با استفاده از پیش‌پردازنده‌های CALWRF و ARW2ARL به فرمت‌های مناسب برای معرفی به کدهای IRPUFF، CALPUFF و HYSPLIT و HYSPLIT تبدیل می‌شوند. این روند در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. روند تولید داده‌های هواشناسی برای کدهای پخش محیطی.

۲-۶. مسئله راستی آزمایی

برای صحت‌سنجی و راستی آزمایی کد IRPUFF، از مقایسه کد با کد و همچنین اطلاعات محیطی ثبت‌شده از پخش آلودگی هسته‌ای پس از حادثه فوکوشیما در نیروگاه دایچی ژاپن استفاده شده است.

حادثه نیروگاه فوکوشیما دایچی: زمین‌لرزه شدیدی به بزرگی ۹ ریشتر در ساعت ۵:۴۶ روز ۱۱ مارس ۲۰۱۱ در ساحل شرقی ژاپن رخ داد. امواج سونامی حاصل از این زمین‌لرزه با پیشروی به سمت این سواحل، نیروگاه دایچی را که دارای ۶ راکتور آب جوشان بود را در خود غرق کرد. سه واحد از این نیروگاه در حال کار در توان نامی خود بوده و سه واحد دیگر در مرحله سوخت‌گذاری بودند. با قطعی برق حاصل زلزله و غرق

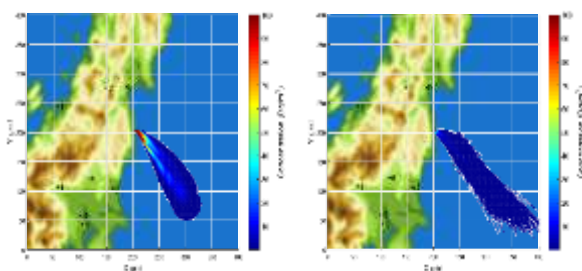
(by-code verification) و برای نشان دادن اثر تفاوت مدل بر نتایج که در راستی آزمایی مهم است از کد HYSPLIT بهره برده شده است.

راستی آزمایی (validation) نتایج با اطلاعات پایگاه داده MEXT انجام شده است. داده‌های هواشناسی از شبکه هواشناسی جهانی NCEP [۱۰] دریافت و با استفاده از ابزار WRF جهت استفاده در کد IRPUFF پردازش شد و از فرآیند فرونشست نیز به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی در هر سه کد صرف نظر شد.

مشخصات چشمه آلودگی هسته‌ای ناشی از حادثه فوکوشیما نیز از مرجع [۱۵] گرفته شد. برای شبیه‌سازی تنها اطلاعات ذرات ^{137}Cs و ^{131}I چشمه آلودگی در دسترس بود و با توجه به اینکه پایگاه داده MEXT نتایج را برحسب نرخ دز مؤثر رادیو ایزوتوپ‌ها ارائه کرده است، غلظت محاسبه شده در مدل‌سازی‌ها از ضرایب تبدیلی ارائه شده در سایت HYSPLIT برای تبدیل غلظت به نرخ دز مؤثر [۱۹]، استفاده شده است.

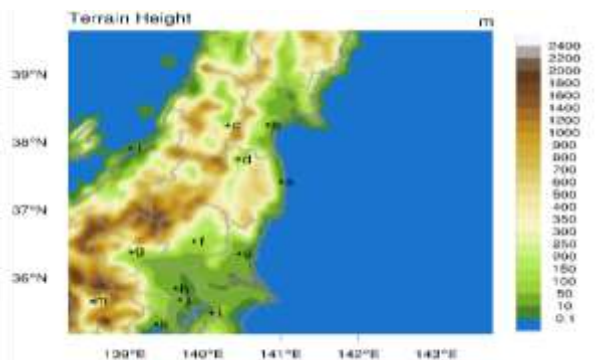
شکل‌های (۶) تا (۱۲)، قسمتی از نتایج به دست آمده از الگوهای پخش را برای ^{131}I کد IRPUFF (شکل سمت راست) و کد HYSPLIT (شکل سمت چپ) [۲۰] نشان می‌دهند. لازم به ذکر است نتایج مربوط به کد CALPUFF در این قسمت بسیار مشابه کد IRPUFF است که از تکرار آن اجتناب شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشهود است در روزهای ابتدایی پس از این حادثه بیشتر مسیر آلودگی به سمت اقیانوس آرام بوده ولی در طی روزهای ۱۴ تا ۱۶ مارس با تغییر مسیر باد به سمت جنوب و در ادامه به سمت غرب، خشکی‌های ژاپن نیز در معرض آلودگی هسته‌ای قرار گرفته است. رفتار کلی پخش آلودگی در این دو کد (کدهای HYSPLIT و IRPUFF) مشابه است ولی تفاوت‌هایی به دلیل مدل‌های مختلف مورد استفاده برای شبیه‌سازی در این دو کد دیده می‌شود. برای نمایش بهتر این اختلاف، میزان نرخ دز مؤثر رسیده به هر شهر بر اساس ساعت نیز در ادامه آورده شده است. از آنجایی که ورودی چشمه برای ایزوتوپ‌های مورد مطالعه به صورت (Bq hr^{-1}) است، کد غلظت‌ها را به صورت (Bq m^{-3}) تولید می‌کند. برای تبدیل این مقدار به دز $(\mu\text{Sv hr}^{-1})$ از توابع داخلی کد HYSPLIT استفاده شده است.



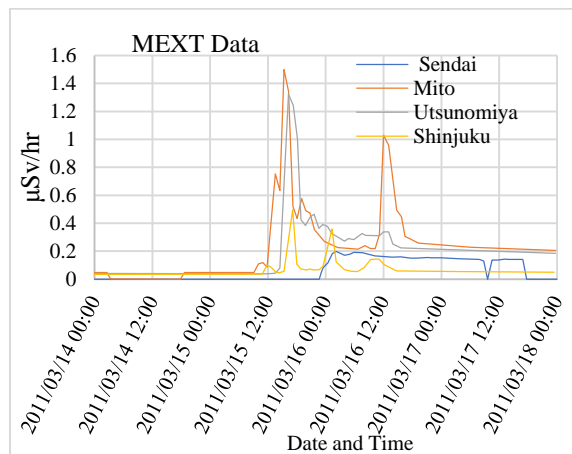
شکل ۶. میانگین غلظت ^{131}I در روز ۱۱ مارس ۲۰۱۱.

(MEXT) بوده است [۱۸]. از بین پایگاه داده‌ی MEXT، شهرهای مهمی که در محدوده شبکه و زمان این مدل سازی قرار دارد انتخاب شدند و مقایسه مقادیر مدل‌سازی شده و محیطی مشاهده شده برای این شهرها ارائه شده است (شکل ۵).



نمایه	استان	شهر	فاصله از محل حادثه (km)
a	Fukushima	Fukushima	-
b	Miyagi	Sendai	۹۰
c	Yamagata	Yamagata	۱۰۷
d	Ibaraki	Mito	۱۲۸
e	Tochigi	Utsunomiya	۱۴۰
f	Gunma	Maebashi	۲۰۹
g	Saitama	Saitama	۲۱۳
h	Tokyo	Shinjuku	۲۲۶
i	Niigata	Niigata	۱۸۰

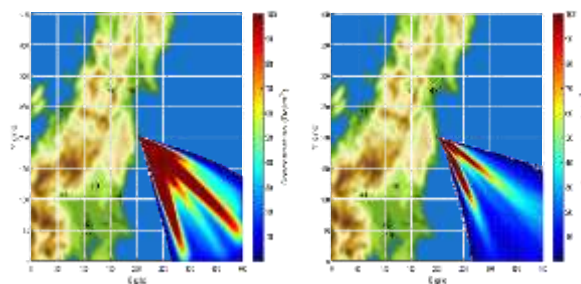
شکل ۴. ناحیه مدل‌سازی (ناهمواری‌های زمین).



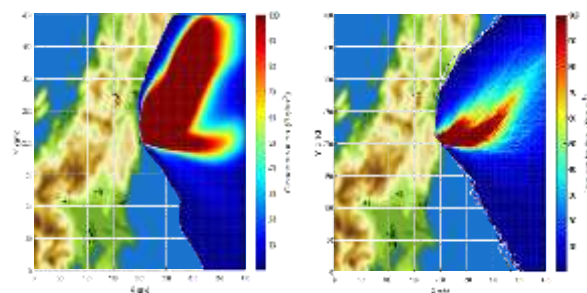
شکل ۵. داده‌های MEXT برای شهرهای مختلف.

۳. نتایج و بحث

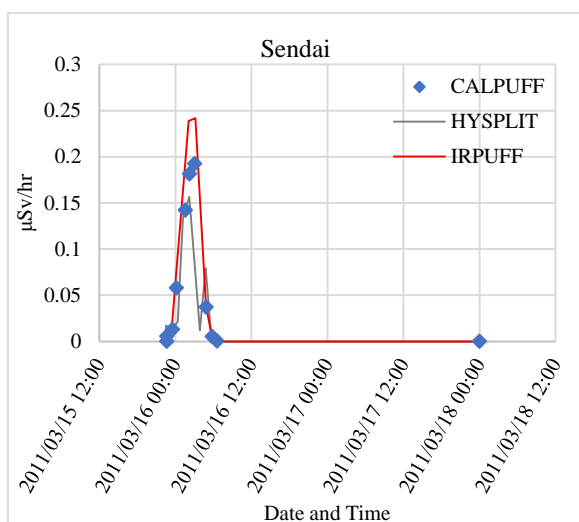
برای صحت‌سنجی و راستی آزمایی کد IRPUFF در محدوده ناحیه‌ای، پخش آلودگی ناشی از حادثه هسته‌ای فوکوشیما در ناحیه‌ای به مرکزیت موقعیت نیروگاه با طول و عرض 400×400 کیلومتر به مدت ۱۵۲ ساعت با شبکه‌بندی 1×1 کیلومتر و گام زمانی یک ساعت انتخاب شده است. از کد معتبر CALPUFF به دلیل استفاده از مدل پاف در صحت‌سنجی استفاده شده (code-



شکل ۱۲. میانگین غلظت I131 در روز ۱۷ مارس ۲۰۱۱.



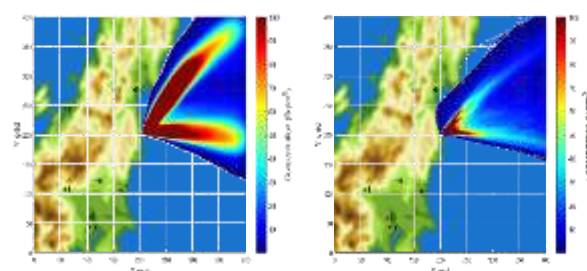
شکل ۷. میانگین غلظت I131 در روز ۱۲ مارس ۲۰۱۱.



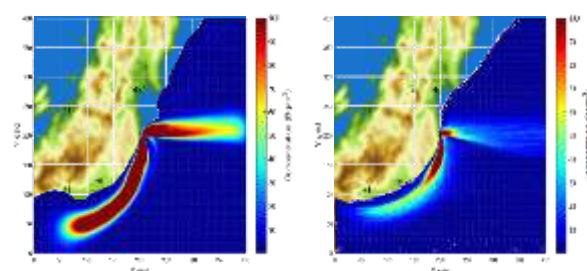
شکل ۱۳. مقایسه نرخ دز مؤثر در شهر Sendai در استان Miyagi.

مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده در شهر Sendai که در ۹۰ کیلومتری شمال نیروگاه فوکوشیما قرار دارد، نشان می‌دهد که زمان رسیدن توده مواد رادیواکتیو مدل‌سازی شده به شهر با مقادیر محیطی ثبت‌شده تطابق خوبی دارد. مقدار به‌دست‌آمده با استفاده از برنامه IRPUFF مقدار بیشتری را نسبت به بقیه موارد پیش‌بینی کرده است. به دلیل فاصله کمتر این شهر با نیروگاه نسبت به شهرهای دیگر، میزان فرونشست مواد در این شهر قابل‌توجه بوده و همان‌طور که در داده‌های پایگاه MEXT نشان داده‌شده است پس از گذشت توده آلودگی همچنان در ناشی از آن مشاهده می‌شود. در نتایج شبیه‌سازی کدها به دلیل صرف‌نظر از فرآیند فرونشست این مقادیر وجود ندارد.

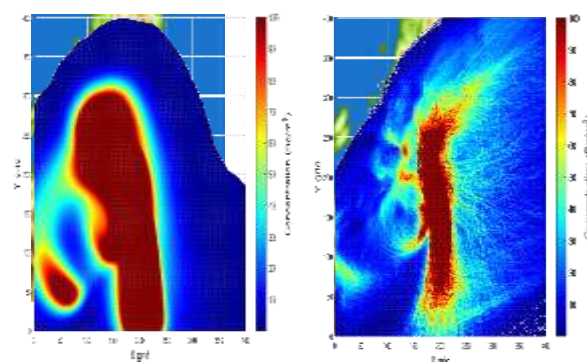
در شهر Mito خروجی‌های IRPUFF و CALPUFF دارای تطبیق خوبی با یکدیگر می‌باشند و روند تغییرات تطابق خوبی با پایگاه داده MEXT دارد. اختلاف زمانی نتایج با مقادیر محیطی با توجه به عدم تکرار در شکل‌ها دیگر می‌تواند ناشی از ابعاد شبکه و عدم امکان در نظر گرفتن مکان دقیق گیرنده در یکی از شبکه‌ها باشد. قابل‌ذکر است که HYSPLIT در پیش‌بینی قله دوم در این شهر ناتوان بوده است. به دلیل مقادیر غیر صفر مشاهده‌شده بعد از حرکت توده آلودگی می‌توان نتیجه گرفت که مقداری فرونشست مواد رادیواکتیو در این شهر نیز رخ داده است.



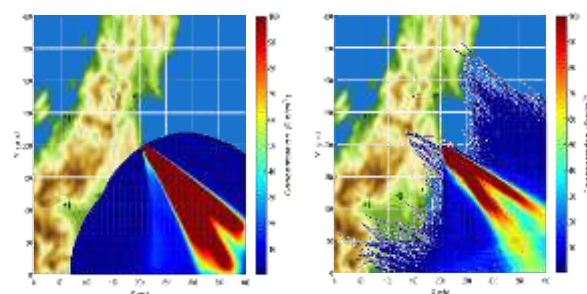
شکل ۸. میانگین غلظت I131 در روز ۱۳ مارس ۲۰۱۱.



شکل ۹. میانگین غلظت I131 در روز ۱۴ مارس ۲۰۱۱.



شکل ۱۰. میانگین غلظت I131 در روز ۱۵ مارس ۲۰۱۱.



شکل ۱۱. میانگین غلظت I131 در روز ۱۶ مارس ۲۰۱۱.

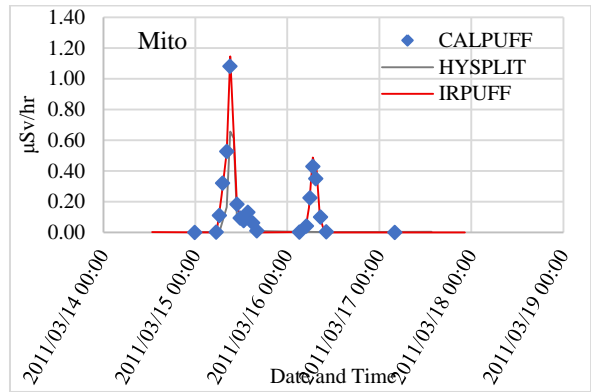
پاف‌ها از مرز پایینی شدند ولی پس از آن با بازگشت مسیر باد مواد رادیواکتیو دوباره به سمت شهر بازگشته است؛ که مدل‌ها به دلیل محدودیت ناحیه مورد مطالعه توانایی پیش‌بینی این شرایط را نداشته‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

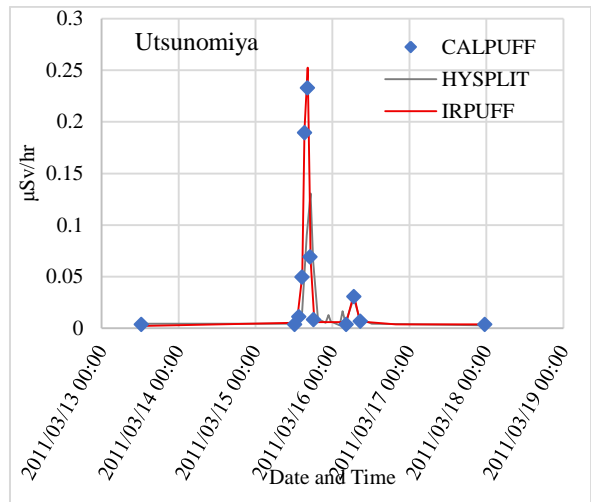
در این مقاله روند شبیه‌سازی در کد IRPUFF ارائه و صحت‌سنجی عملکرد آن با بررسی نتایج شبیه‌سازی حادثه فوکوشیما در مقایسه با دو کد CALPUFF و HYSPLIT انجام شد. برای راستی آزمایی نیز نتایج با مقادیر گزارش شده توسط پایگاه داده MEXT برای برخی از شهرهای مهم مورد بررسی قرار گرفت. از مقایسه بین نتایج کدها با یکدیگر همان‌گونه که انتظار می‌رود نتایج حاصل از کد IRPUFF به نتایج کد CALPUFF نزدیکی بیشتری دارد که ناشی از اطلاعات ورودی و مدل یکسان است و می‌تواند بیانگر صحت پیاده‌سازی مدل پاف در کد IRPUFF باشد. روند تغییرات نتایج گزارش شده نیز تطابق خوبی را با کد HYSPLIT نشان می‌دهد و با توجه به تطابق خوب نتایج IRPUFF با کد معتبر CALPUFF اختلاف در بزرگی مقادیر می‌تواند ناشی از اثر مدل‌های مختلف بکار گرفته شده در این دو کد باشد که تفاوت نتایج به دلیل تفاوت مدل باید در راستی آزمایی مورد توجه قرار گیرد. در مجموع نتایج نشان‌دهنده صحت عملکرد کد در مقایسه با کد معتبر CALPUFF است ولی برای راستی آزمایی مستقیم کد IRPUFF نیازمند دسترسی به اطلاعات دقیق شرایط مسئله واقعی است. توسعه کدهای بومی همانند IRPUFF علاوه بر کسب دانش فنی، امکان شخصی‌سازی محاسبات و همچنین هم‌بسته‌سازی با دیگر کدها برای محاسبات پیچیده‌تر را فراهم می‌سازد. اکثر کدهای غیربومی تنها در مرحله توسعه منبع باز می‌باشند و پس از اشکال‌گیری و نهایی‌سازی به صورت یک کد تجاری ارائه می‌شوند که نیاز به پرداخت‌های ارزی جهت دریافت مجوز است که با توجه به تحریم‌ها در صنعت هسته‌ای دسترسی به آن‌ها را با مشکلات عدیده روبرو می‌کند. مقاله حاضر به‌عنوان گام نخست در معرفی کد IRPUFF به شمار می‌آید و گروه توسعه‌دهنده در نظر دارد با اضافه کردن قابلیت مختلف از جمله شبیه‌سازی شرایط مختلف آب و هوایی و جزئیاتی همچون نفوذ آلودگی به لایه‌مرزی سیاره‌ای و بازگشت از آن، دقت و قابلیت‌های آن را افزایش دهد.

۵. مراجع‌ها

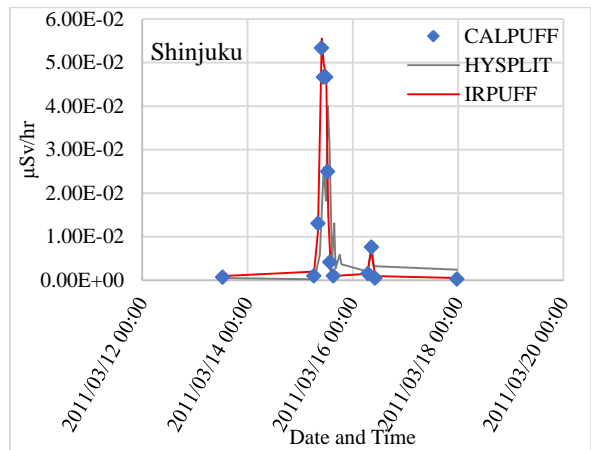
- [۱] Daly, A.; Zannetti, P. "Air Pollution Modeling—An Overview"; Ambient Air Pollution ۲۰۰۷, ۱۵-۲۸.
- [۲] Briggs, G. A. "Plume Rise: A Critical Survey"; Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab. Oak Ridge, Tenn. ۱۹۶۹.
- [۳] Aghaie, M.; Minuchehr, A.; Alahyarizadeh, G. "Evaluation of Atmospheric Dispersion of Radioactive Materials in a Severe Accident of the BNPP Based on Gaussian Model";



شکل ۱۴. نرخ دز مؤثر در شهر Mito در استان Ibaraki.



شکل ۱۵. نرخ دز مؤثر در شهر Utsunomiya در استان Tochigi.



شکل ۱۶. نرخ دز مؤثر در شهر Shinjuku در استان Tokyo.

در شهر Utsunomiya مقادیر مدل‌سازی شده با استفاده از CALPUFF و IRPUFF حدود ۵ مرتبه و مقادیر شبیه‌سازی شده با HYSPLIT حدود ۱۰ مرتبه کمتر تخمین زده شده است.

با توجه به محدود بودن ناحیه مورد مطالعه، پاف‌های خارج شده از مرزهای ناحیه از بین می‌روند و دیگر در محاسبات وارد نمی‌شوند. همان‌گونه که در نمودار مربوط به شهر Shinjuku در شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد تغییر جریان‌های بادی باعث خروج

- [۱۲] Agh, A.; Aghaie, M.; Zangian, M. "Time Dependent Modelling of Atmospheric Dispersion from a Known Source Term"; Master of Science, Department of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, ۲۰۱۹.
- [۱۳] Raskob, W.; Dechy, N.; Donovan, A.; Gallego, E.; Nanba, K.; Tanzi, C.; Wiens, M.; Hernandez Ceballos, M. "Fukushima Daiichi Accident in ۲۰۱۱"; Science for Disaster Risk Management ۲۰۲۰-Acting Today, Protecting Tomorrow, ۲۰۲۰.
- [۱۴] Chino, M.; Nakayama, H.; Nagai, H.; Terada, H.; Katata, G.; Yamazawa, H. "Preliminary Estimation of Release Amounts of ^{131}I and ^{137}Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere"; J. nucl. sci. technol. ۲۰۱۱, ۴۸, ۱۱۲۹-۱۱۳۴. DOI: ۱۰.۱۰۸۰/۱۸۸۱۱۲۴۸.۲۰۱۱.۹۷۱۱۷۹۹.
- [۱۵] Katata, G.; Chino, M.; Kobayashi, T.; Terada, H.; Ota, M.; Nagai, H.; Kajino, M.; Draxler, R.; Hort, M.; Malo, A. "Detailed Source Term Estimation of the Atmospheric Release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident by Coupling Simulations of an Atmospheric Dispersion Model with an Improved Deposition Scheme and Oceanic Dispersion Model"; Atmos. Chem. Phys. ۲۰۱۵, ۱۵, ۱۰۲۹-۱۰۷۰. DOI: ۱۰.۵۱۹۴/acp-۱۵-۱۰۲۹.۲۰۱۵.
- [۱۶] Stohl, A.; Seibert, P.; Wotawa, G.; Arnold, D.; Burkhardt, J. F.; Eckhardt, S.; Tapia, C.; Vargas, A.; Yasunari, T. "Xenon- 133 and Caesium- 137 Releases into the Atmosphere from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant: Determination of the Source Term, Atmospheric Dispersion, and Deposition"; Atmos. Chem. Phys. ۲۰۱۲, ۱۲, ۲۳۱۳-۲۳۴۳. DOI: ۱۰.۵۱۹۴/acp-۱۲-۲۳۱۳.۲۰۱۲.
- [۱۷] Terada, H.; Katata, G.; Chino, M.; Nagai, H. "Atmospheric Discharge And Dispersion Of Radionuclides During The Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant Accident. Part II: Verification of the Source Term and Analysis of Regional-Scale Atmospheric Dispersion"; J. Environ. Radioact. ۲۰۱۲, ۱۱۲, ۱۴۱-۱۵۴. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jenvrad.۲۰۱۲.۰۵.۰۲۳.
- [۱۸] Ministry of Education, C. Sports, Science and Technology "Reading of Environmental Radioactivity Level by Prefecture";
<http://www.mext.go.jp/en/incident/title01/detail01/sdetail01/sdetail01/sdetail01/1373169.htm>.
- [۱۹] Draxler, R. R.; Hess, G. "An Overview of the HYSPLIT_ξ Modelling System for Trajectories"; Australian Meteorological Magazine, ۱۹۹۸, ۴۷, ۲۹۵-۳۰۸.
- [۲۰] Draxler, R. R.; Hess, G. "Description of the HYSPLIT_ξ Modeling System"; ۱۹۹۷.
- Prog. Nucl. Energy ۲۰۱۹, ۱۱۳, ۱۱۴-۱۲۷. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.pnucene.۲۰۱۹.۰۱.۰۱۹.
- [۴] Pirouzmand, A.; Kowsar, Z.; Dehghani, P. "Atmospheric Dispersion Assessment of Radioactive Materials During Severe Accident Conditions for Bushehr Nuclear Power Plant Using HYSPLIT"; Prog. Nucl. Energy ۲۰۱۸, ۱۰۸, ۱۶۹-۱۷۸. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.pnucene.۲۰۱۸.۰۵.۰۱۵.
- [۵] Pirouzmand, A.; Dehghani, P.; Hadad, K.; Nematollahi, M. "Dose Assessment of Radionuclides Dispersion from Bushehr Nuclear Power Plant Stack Under Normal Operation and Accident Conditions"; Int. J. Hydrogen Energy ۲۰۱۵, ۴۰, ۱۵۱۹۸-۱۵۲۰۵. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijhydene.۲۰۱۵.۰۶.۰۴۳.
- [۶] Scire, J. S.; Strimaitis, D. G.; Yamartino, R. J. "A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model"; Earth Tech. Inc. ۲۰۰۰, ۵۲۱, ۱-۵۲۱.
- [۷] Pasquill, F. "The Estimation of the Dispersion of Windborne Material"; Met. Mag. ۱۹۶۱, ۹۰, ۳۲.
- [۸] Abarbanel, H. D.; Holm, D. D.; Marsden, J. E.; Ratiu, T. "Richardson Number Criterion for the Nonlinear Stability of Three-Dimensional Stratified Flow"; Phys. Rev. Lett. ۱۹۸۴, ۵۲, ۲۳۵۲. DOI: ۱۰.۱۱۰۳/PhysRevLett.۵۲.۲۳۵۲.
- [۹] Scire, J. S.; Robe, F. R.; Fernau, M. E.; Yamartino, R. J. "A User's Guide for the CALMET Meteorological Model"; Earth Tech, USA, ۲۰۰۰, ۳۷.
- [۱۰] Commerce, N. C. f. E. P. N. W. S. N. U. D. O. "NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing From July ۱۹۹۹"; Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, ۲۰۰۰.
- [۱۱] Peckham, S. E. "WRF/Chem Version ۳.۳ User's Guide"; ۲۰۱۲.