

## شبیه‌سازی پاشندگی جوی و دز فردی بیشینه با مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای نیروگاه بوشهر

مسعود فیضی‌نژاد<sup>۱</sup>، حسین ملکوتی<sup>۲</sup>، مسعود صدری‌نسب<sup>۳</sup>، سرمهد قادر<sup>۴</sup>، دانیال یازجی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تخصصی فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان، masoudfeizi@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، malakooti@hormozgan.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، masoud.sadri@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، sghader@ut.ac.ir

<sup>۵</sup> محقق پسادکتری هوشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، daniel.yazgi@ut.ac.ir

### چکیده

در کار حاضر از یک مدل جفت‌شده WRF-HYSPLIT برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی نحوه پاشندگی جوی آلاینده‌های پرتوی نیروگاه بوشهر استفاده می‌شود. ابتدا عملکرد مدل WRF با ترکیب‌های مختلف طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی برای منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس در ادامه شبیه‌سازی پاشندگی و محاسبات دز با این مدل جفت‌شده انجام گردید. محاسبه دز معادل موثر سالانه بیشینه فردی گروه سنی بزرگسال، برای سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۴ میلادی به ترتیب مقادیر  $y/Sv$   $10^{-8} \times 6.7 \times 10^{-8}$  و  $10^{-7} \times 1.1 \times 10^{-7} Sv/y$  مقایسه شده است. نسبت دز محاسبه شده به حد دز قانونی برای کار عادی نیروگاه نشان می‌دهد پرتوگیری سالانه مردم در زمان کارکرد عادی نیروگاه بسیار ناچیز است.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی، WRF، پارامترسازی، HYSPLIT، محاسبات دز، نیروگاه بوشهر

## Simulation of atmospheric dispersion and maximum individual dose for Bushehr Power Plant using WRF-HYSPLIT model

Masoud Feyzinejad<sup>1</sup>, Hossain Malakooti<sup>2</sup>, Masoud Sadrinasab<sup>3</sup>, Sarmad Ghader<sup>4</sup>, Daniel Yazgi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate of physical oceanography, Hormozgan University

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Marine Sciences and Technologies, Hormozgan University

<sup>3</sup> Associate Professor, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran

<sup>4</sup> Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>5</sup> Postdoctoral of Meteorology, Institute of Geophysics, University of Tehran

### Abstract

In this work, a system of coupled meteorology-dispersion model, WRF-HYSPLIT, is used. Sensitivity and validation of the WRF model, is conducted by utilizing different combinations of physical parameterization schemes in study area. Dispersion simulations and annual effective dose for adult age group are carried out using this coupled model under normal conditions for Bushehr power plant. Calculated maximum annual effective dose for adult age group by the coupled model for the years 2014-2016, provided  $5.8 \times 10^{-8} Sv$ ,  $6.7 \times 10^{-8} Sv$  and  $1.1 \times 10^{-7} Sv$  respectively. These results are compared by those addressed in ER and FSAR reports. Ratio of calculated dose to legal dose limit for Bushehr power plant under normal operation shows public annual exposure dose for normal operation is negligible compared to the legal limit

**Keywords:** Simulation, WRF, HYSPLIT, Dose calculations, Bushehr power plant

### ۱ مقدمه

مدل‌های پاشندگی جوی در نیروگاه‌ها برای مطالعه پراکندگی نشر عناصر رادیواکتیو در طول شرایط کار عادی و حادثه‌ای استفاده می‌گردد. بطور کلی مشاهدات هوشناسی محدوده نیروگاه و همچنین خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا مانند WRF می‌توانند به عنوان ورودی هوشناسی مدل پاشندگی و برای پیش‌بینی نشر آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

این مدل‌ها میدان متغیرهای هواشناسی از جمله میدان‌های باد، دما، فشار و غیره را در اختیار قرار می‌دهند. چندین مطالعه در گذشته برای ارزیابی پاشندگی جوی و محاسبات پرتوگیری (dose calculation) نیروگاه هسته‌ای بوشهر انجام شده است. که از جمله آنها می‌توان به کارهای انجام شده توسط فیضی‌نژاد و خاموشی (۱۳۸۳)، ملکوتی و فیضی‌نژاد (۱۳۸۳)، رئیس‌علی و همکاران (۲۰۰۶) و سهرابی و همکاران (۲۰۱۳) اشاره نمود.

کار حاضر تلاشی در جهت توسعه شبیه‌سازی‌های پاشندگی بدون فرضیات و ساده‌سازی‌های مدل گوسی و با استفاده از یک مدل لاغرانژی پخش و انتشار جوی است. این کار با ایجاد یک سامانه جفت شده هواشناسی-پاشندگی (WRF-HYSPLIT) صورت می‌گیرد. برای این کار مدل پاشندگی HYSPLIT که یکی از مدل‌های پرکاربرد و معتبر در زمینه کار مقاله حاضر می‌باشد (دراسلر و هس، ۲۰۰۴)، درنظر گرفته شده است. بعلاوه در کار حاضر مدل هواشناسی میان مقیاس WRF جهت تامین داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل پاشندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه محاسبات دز فردی بیشینه ناشی از کار عادی نیروگاه بوشهر نیز ارائه می‌گردد.

## ۲ مدل WRF

در کار حاضر همان‌گونه که ذکر شد از مدل WRF (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸) برای تامین داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل پاشندگی استفاده می‌شود. با توجه به هدف کار حاضر، برای انجام پیش‌بینی‌های مدل WRF از یک حوزه محاسباتی که از ۳ شبکه تو در تو استفاده می‌شود. شکل ۱ نمایی از حوزه محاسباتی را نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه‌های محاسباتی مورد استفاده با تفکیک‌های افقی ۲۷ km با خط سفید رنگ و ۳ km با خط سفید رنگ و ۳ km با خط قرمز رنگ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایی از حوزه محاسباتی WRF برای کار حاضر.

در این تحقیق ابتدا برای یافتن پیکربندی مناسب مدل WRF از دیدگاه پارامترسازی‌های فیزیکی ۸ پیکربندی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته و پس از انجام آزمون‌های اعتبارسنجی و صحبت‌سنگی براساس میدان‌های باد و دما، پیکربندی همراه با کمترین خطای مقایسه با داده‌های مشاهدات مبنای کار قرار گرفت. برای رسیدن به این هدف به این شکل عمل شده که برای تمامی داده‌ها و تمامی نقاط مشاهدات (شامل ایستگاه‌های همدیدی و نقاط مشاهدات ماهواره‌های QuikSCAT و ASCAT) مورد استفاده عملکردهای هر یک از پیکربندی‌ها از دیدگاه ضریب همبستگی بیشتر (CC) و خطای کمتر (RMSE) رده‌بندی شدند. جمع‌بندی نتایج پارامترهای آماری (که به علت حجم زیاد از ارائه آنها در اینجا صرف‌نظر شده) نشان می‌دهد که، از دیدگاه مناسبترین عملکرد پیکربندی‌ها، پیکربندی با ترکیب: خردفیزیک، Lin، تابش طول موج بلند RRTM، تابش طول موج کوتاه Goddard، Eta، سطح زمین Noah، لا یه مرزی MYJ و کومهای Kain-ritsch که بالاترین امتیاز را داشته، به عنوان پیکربندی منتخب برای سامانه هواشناسی-پاشندگی مورد استفاده قرار گرفت.

## ۳ مدل HYSPLIT و اعتبارسنجی آن برای نیروگاه بوشهر

در کار حاضر اعتبار سنجی 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 (AEOI، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳)، از اینجا به بعد ER و تحلیل ایمنی نیروگاه (AEOI، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۵)، از اینجا به بعد FSAR، انجام خواهد شد. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های مدل

پاشندگی HYSPLIT در منطقه نیروگاه بوشهر، داده‌های هواشناسی نیروگاه مورد نیاز است. این داده‌ها از اندازه‌گیری‌های دکل هواشناسی ۱۰۰ متری نیروگاه تامین گردیده است. برای کار حاضر داده‌های اندازه‌گیری سال ۲۰۱۰، مورد استفاده قرار گرفت. ورودی دیگر مدل یعنی مقادیر آلاینده (فهرست رادیونوکلئیدها) رهاسده از دودکش نیروگاه، بعنوان ورودی مدل پاشندگی مطابق گزارش ایمنی نیروگاه (FSAR نسخه ۲۰۱۵) می‌باشد.

شبیه‌سازی برای تمامی رادیونوکلئیدهای خروجی دودکش نیروگاه و در محدوده ۲۵۰ km نیروگاه با تفکیک افقی  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ ، انجام شد. در مدت شبیه‌سازی بیش از یک میلیون ذره رها گردید. گام زمانی محاسبات برابر  $75^{\circ}$  گام شبکه انتخاب شد. زمان شبیه‌سازی ۷۵۴۷ ساعت می‌باشد و فرض می‌شود که در تمام مدت انجام شبیه‌سازی آلاینده در حال رهاسازی می‌باشد. جدول ۱ نمونه‌ای نتایج بخش اعتبارسنجی کار حاضر را در مقایسه با سایر کارهای انجام شده نشان می‌دهد.

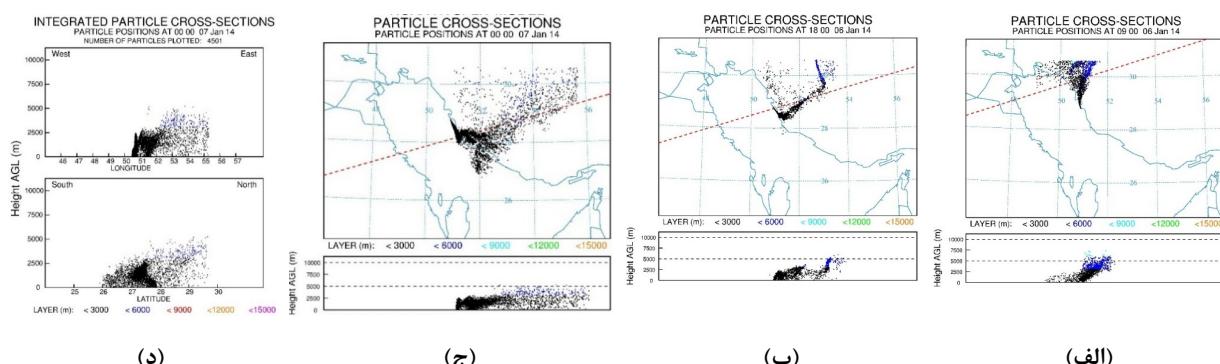
جدول ۱. دز معادل موثر بیشینه سالانه، گروه سنی بزرگسال (Sv/y) برای اعتبار سنجی مدل HYSPLIT

سهرایی و همکاران ۲۰۱۳	زالی و همکاران ۲۰۱۷	ER ۲۰۰۳	ER ۲۰۱۳	FSAR ۲۰۱۵	کارحاضر	حد دز
$1/3 \times 10^{-7}$	$3/8 \times 10^{-8}$	$1/6 \times 10^{-7}$	$5/1 \times 10^{-8}$	$7/7 \times 10^{-8}$	$2/1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-4}$

#### ۴ شبیه‌سازی‌های مدل جفت شده WRF-HYSPLIT

برای تعدادی از تاریخ‌های منتخب، شبیه‌سازی پاشندگی برای ۲۴ ساعت اجرای مدل جفت شده هواشناسی-پاشندگی (WRF-HYSPLIT) انجام شد. لازم به ذکر است که بدلیل تعداد زیاد شبیه‌سازی‌های انجام شده، در اینجا برای اختصار فقط نتایج یک شبیه‌سازی ارائه شده است. الگوی پاشندگی پلوم ذرات رهاسده از دودکش نیروگاه، برای تاریخ مذکور در شکل ۲ ارائه شده است. در ساعت‌های ابتدایی پاشندگی، پلوم دارای جهت NW بوده و در ساعت‌های انتهایی شبیه‌سازی پلوم به سمت SE تغییر جهت می‌دهد. همچنین برای درک بهتر رفتار پلوم، مقاطع طولی و عرضی پلوم ذرات نیز نشان داده شده است. چگالی ذرات زیر ارتفاع ۲۵۰۰ متر بیشترین مقدار را داشته و برخی دیگر خود را به سطوح بالاتر رسانده‌اند. این نیمروز تصویر قابل توجه‌ای از پاشندگی در راستای قائم و عمق نفوذ پلوم که تابعی از تلاطم جوی است را نشان می‌دهد. الگوهای بدست آمده از شبیه‌سازی پاشندگی برای تاریخ منتخب نشان می‌دهد که رفتار و هندسه پلوم تابع میدان باد (سرعت و جهت) و خصوصیات لایه مرزی (تلاطم و پایداری جو) منطقه مورد مطالعه می‌باشد. لازم به ذکر است الگوی بلند مدت پاشندگی منطقه نیروگاه بوشهر، تابع جهت باد غالب در منطقه که شمال‌غربی (NW) است می‌باشد.

نتایج محاسبات دُز با شبیه‌سازی‌های مدل جفت شده WRF-HYSPLIT نیز در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج کارهای انجام شده توسط دیگران و گزارش‌های ایمنی و محیطی نیروگاه نیز در جدول مذکور ارائه شده‌اند. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌ها با دقت بسیار مناسبی برای مقادیر دُز فردی موثر بیشینه انجام شده و این مدل جفت شده می‌تواند برای پیش‌بینی‌های پاشندگی و محاسبات دُز مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲. توزیع مکانی ذرات شبیه‌سازی پاشندگی با مدل جفت شده WRF-HYSPLIT برای ساعت‌های مختلف بعد از رهاسازی برای ۲۰۱۴/۰۱/۰۶ (الف) ساعت ۹، (ب) ساعت ۱۸، (ج) ساعت ۲۴، (د) برش قائم پلوم.

جدول ۲. دز فردی موثر سالانه بیشینه، گروه سنی بزرگسال مدل جفت شده WRF-HYSPLIT

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

## ۵ نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به شبیه‌سازی پاشندگی با مدل جفت شده WRF-HYSPLIT، عنوان ابزاری کاربردی در ارزیابی پاشندگی جوی نیروگاه بوشهر و محاسبات دز برای شرایط کار عادی نیروگاه بوشهر پرداختیم. بعد از اعتبارسنجی مدل، شبیه‌سازی‌های پخش و انتشار با استفاده از مدل جفت شده WRF-HYSPLIT انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با این مدل جفت شده برای برخی تاریخ‌های منتخب ارائه شد. محاسبات دز با شبیه‌سازی‌های این مدل جفت شده برای شرایط کارکرد عادی نیروگاه نشان داد که مدل WRF-HYSPLIT شامل مدل هواشناسی WRF به عنوان تامین کننده داده‌های میدان باد و سایر پارامترهای جوی برای مدل پاشندگی HYSPLIT می‌تواند به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی پاشندگی و محاسبات پرتوگیری نیروگاه بوشهر مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

- فیضی‌نژاد، م. و خاموشی، س.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی پخش جوی در نیروگاه هسته‌ای بوشهر: مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۳۱، ۴۲-۳۵.
- ملکوتی، ح. و فیضی‌نژاد، م.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی بلندمدت پخش آلاینده‌ها ناشی از رهاسازی رادیونوکلئیدها از واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر: دومین کنفرانس بین المللی هسته‌ای ایران، شیراز، ۸ تا ۱۱ اردیبهشت.
- AEOI, 2003, Bushehr Nuclear Power Plant: Environmental Report (ER).
- AEOI, 2013, Bushehr Nuclear Power Plant: Environmental Report-2 (ER2).
- AEOI, 2015. Final Safety Analysis Report of BNPP-1.
- Draxler, R.R., and Hess, G.D., 2004, Description of the HYSPLIT\_4 modeling system: NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 25 pp.
- INRA, 2008, Radiation protection criteria for Bushehr nuclear power plant (BNPP-1): Tehran, Iran.
- Raisali, G., Davilu, H., Haghishishad, 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.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J., 2008: A description of the advanced research wrf version 3, NCAR/TN-475+STR.
- Sohrabi M, Parsouzi Z, Amrollahi R, Khamooshy C, Ghasemi M., 2013, Public exposure from environmental release of radioactive material under normal operation of unit-1 Bushehr nuclear power plant: Ann. Nucl Energy, 55, 351-358.
- Zali, A., Shamsaei Zafarghandi, M., Feghhi, S.A., 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.