



استفاده از مدل سوان در پیش‌گویی چگونگی پخش مواد پرتوزا در آب‌های سطحی سواحل شمالی دریای عمان

محمدرضا زارع^۱، سیدمجتبی مستجاب‌الدعواتی^{۲*}، محمدرضا عبدی^۱، اسماعیل حسن‌زاده^۱
۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران
۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فن آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

چکیده: هدف این پژوهش، پیاده‌سازی یک طرح نمونه برداری مدیریت شده به منظور برآورد سریع پخش هسته‌های پرتوزای طبیعی در سواحل شمالی دریای عمان بود. نتیجه‌ی این پژوهش می‌تواند برای برآورد سریع پخش هسته‌های پرتوزای ناشی از رخدادهای هسته‌ای در آب‌های سطحی سواحل شمالی دریای عمان نیز به کار گرفته شود. با اندازه‌گیری غلظت هسته‌های پرتوزای طبیعی در نمونه‌های آب‌های سطحی سواحل دریای عمان و تقسیم منطقه‌ی جغرافیایی تحت مطالعه به ۹ شبکه‌ی منظم، پارامترهای موج در این شبکه‌ها با استفاده از مدل شبه‌ساز نسل سومی سوان مشخص و جهت برتر موج و نقاط با غلظت‌های بالاتر هسته‌های پرتوزای طبیعی با یک‌دیگر ترکیب و نقاط نماینده‌ی نقاط آلوده، برای نمونه برداری معرفی شد. نتایج حاکی از این بود که هسته‌های پرتوزای طبیعی در فاصله‌ی بین شبکه‌های ۸۶۰۰ تا ۸۶۰۴، در شبکه‌ی ۸۶۰۰ تجمع داشته و در فاصله‌ی بین شبکه‌های ۸۶۰۵ تا ۸۶۰۸، به سمت بخش میانی دریای عمان سوق می‌یابند.

کلیدواژه‌ها: طیف‌سنجی پرتوگاما، مدل سوان، پخش مواد پرتوزا، دریای عمان

Using the SWAN Model in Radioactive Material Diffusion Prediction in Surface Waters Along the Northern Coast of Oman Sea

M.R. Zare¹, S.M. Mostajaboddavati^{1,2*}, M.R. Abdi¹, S. Hassanzadeh¹

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran

2. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences and Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran

Abstract: This study aimed to establish a managed sampling plan for a rapid estimation of natural radionuclides diffusion in the northern coast of the Oman Sea. The plan can be developed for the rapid estimate of radionuclide diffusion consequences in post-accidental situations. By determining the concentration of the natural radionuclides in 5 surface water samples, dividing the geographical domain into nine separated grids and using the third generation spectral SWAN model, the preferable wave direction and points with the higher radioactivity concentrations were combined to predict the representative contaminated areas for sampling, even in post-accidental situations. The results indicate that the natural radioactivity concentration between the grids 8600 and 8604 are gathered in the grid 8600 and between the grids of 8605 and 8608 propagating toward the middle part of the Oman Sea.

Keywords: Gamma Spectrometry, SWAN Model, Radioactive Material Diffusion, Oman Sea

*email: mostajab@sci.ui.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۵/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۴/۱۷



۱. مقدمه

جنوب‌غربی است. سرعت میانگین باد در ماه ژوئیه، که از سمت اقیانوس هند می‌وزد، بالاترین است [۵]. منطقه‌ی تحت بررسی در دریای عمان، سواحل شمالی این دریا، محدوده‌ی نوار ساحلی از تنگه‌ی هرمز تا بندر گوادر بود که بین طول جغرافیایی ۵۶ تا ۶۱ درجه و عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۲۶ درجه محصور شده است. این گستره حدود ۹۰۰ کیلومتر است. با توجه به اطلاعات ژرفاسنجی دریافتی از سازمان جغرافیایی کشور، این منطقه به ۹ شبکه‌ی منظم مستطیلی مجزا تقسیم (شکل ۱) و با نام‌های ۸۶۰۱، ۸۶۰۲، ۸۶۰۳، ۸۶۰۴، ۸۶۰۵، ۸۶۰۶، ۸۶۰۷ و ۸۶۰۸ به ترتیب، از شرق به غرب، نام‌گذاری شدند [۶، ۷].

۳. اندازه‌گیری غلظت هسته‌های پرتوزای طبیعی

۵ نمونه از آب‌های سطحی، هر کدام به حجم تقریبی ۱۰۰ لیتر، در بازه‌ی زمانی از هشتم تا دهم اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۰ جمع‌آوری شدند. اندازه‌گیری فعالیت هسته‌های پرتوزای طبیعی موجود در نمونه‌ها با استفاده از یک آشکارساز فوق خالص ژرمانیم (HPGe) قابل حمل (شکل ۲)، با قدرت تفکیک ۱/۸۶ کیلوکنترون ولت و بازدهی نسبی ۴۱/۳ درصد انجام شد [۸، ۹]. تعیین بازده آشکارساز با استفاده از ۶ چشمه‌ی استاندارد ۱۰۰ لیتری مجزا شامل، ^{241}Am ، ^{109}Cd ، ^{57}Co ، ^{133}Ba ، ^{137}Cs و ^{60}Co به انجام رسید [۱۰].

رابطه برای تعیین غلظت هسته‌های پرتوزای طبیعی موجود در نمونه‌های آب، این است

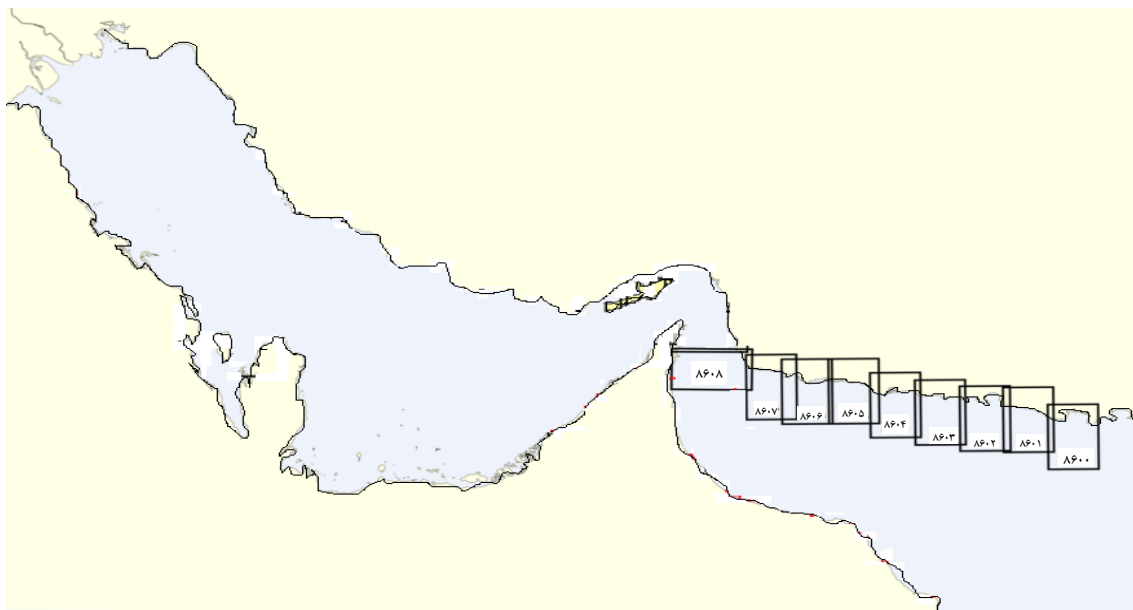
$$A_{(\text{Bq/L})} = \frac{C_{\text{net}}}{\varepsilon(\%) \times (\text{B.R}) \times T \times V} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، C_{net} تعداد شمارش خالص، $\varepsilon(\%)$ بازده آشکارساز، (B.R) نسبت انشعاب، T زمان شمارش و V حجم نمونه است. مقادیر میانگین وزنی شده‌ی غلظت هسته‌های پرتوزای زنجیره‌ی ^{238}U و ^{232}Th و همچنین ^{40}K برای ۵ نمونه آبی در جدول ۱ داده شده است.

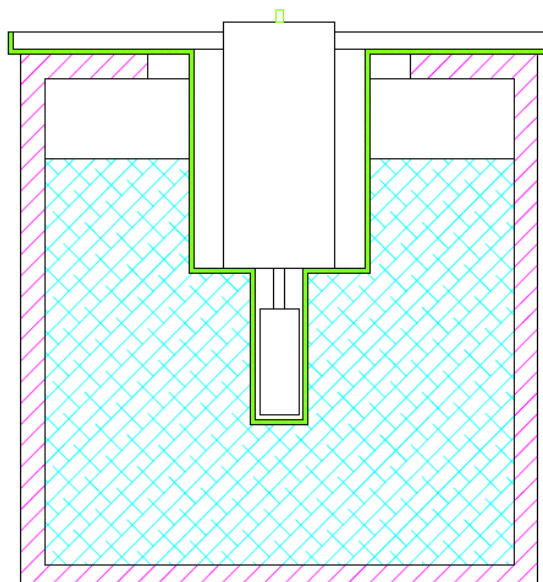
میزان پرتوزایی طبیعی در نمونه‌های رسوب سواحل شمالی دریای عمان، از تنگه‌ی هرمز تا بندر گوادر، پیش از این مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در این پژوهش، پی‌آمدهای مربوط به یک حادثه‌ی ناشی از پخش ناخواسته‌ی مواد پرتوزا در محیط‌های دریایی، از جمله دریای عمان، مورد بررسی قرار گرفت. تلفیق نتایج تحلیل نمونه‌های آب‌های سطحی با یک مدل مناسب، الگویی را برای دنبال نمودن ردپای هسته‌های پرتوزای طبیعی و حتی غیرطبیعی پخش شده در آب‌های سطحی این سواحل به دست داد. هدف این بررسی، پایه‌گذاری راه کاری است که راهنمای مناسبی برای متخصصین و تصمیم‌سازان باشد تا بتوانند شرایط بعد از رخدادهای پخش مواد پرتوزا را مدیریت کنند. به منظور برآورد سریع پی‌آمدهای ناشی از پخش مواد پرتوزا در محیط‌های دریایی و هم‌چنین به منظور پایه‌گذاری یک طرح نمونه برداری جامع و مدیریت شده در نقاط خاصی از این محیط‌های دریایی، داده‌هایی هم‌چون جهت موج‌های ناشی از باد و غلظت عناصر پرتوزا در آب‌های سطحی، از اهمیت بالایی برخوردارند: جهت میانگین موج‌ها و نقاط با غلظت‌های پرتوزایی بالاتر با هم ترکیب می‌شوند تا نقاط آلوده به مواد پرتوزا را برای نمونه برداری معرفی کنند [۲، ۳]. شبیه‌سازی پارامترهای موج، با هدف دستیابی به جهت میانگین موج، براساس مدل موج نسل سوم سوآن^(۱) به انجام رسید [۴]. تحلیل هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های آب‌های سطحی نیز بر پایه‌ی طیف‌سنجی گامای مجهز به آشکارساز قابل حمل فوق خالص ژرمانیم (HPGe) با قدرت تفکیک بالا انجام و جهت‌های برتر موج، یعنی جهت‌های معادل با جهت پخش مواد پرتوزا و هم‌چنین نقاط خاص نمونه برداری از آب‌های سطحی معرفی شدند.

۲. منطقه‌ی مورد مطالعه

دریای عمان، بخش شمالی دریای عرب است که به وسیله‌ی ایران در شمال، عمان در جنوب و امارات متحده‌ی عربی در غرب محصور شده است. دریای عمان اساساً تحت تأثیر بادهای فصلی از سوی اقیانوس هند قرار دارد که جهت آن در فصل تابستان، به سمت شمال شرقی و در فصل زمستان، به سمت



شکل ۱. منطقه‌ی مورد بررسی و ۹ شبکه‌ی جغرافیایی مجزای شرقی در امتداد سواحل شمالی دریای عمان.



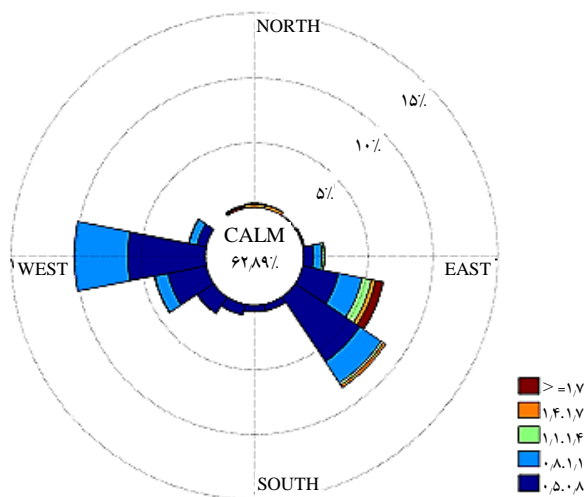
شکل ۲. سامانه‌ی آشکارسازی به همراه ظرف اندازه‌گیری نمونه‌های حجم- بالای آب.

جدول ۱. غلظت هسته‌های پرتوزای طبیعی موجود در نمونه‌های آب حجم- بالای سواحل شمالی دریای عمان

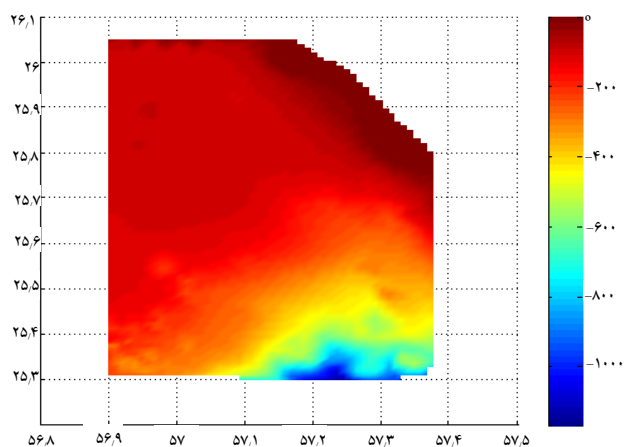
پتاسیم- ۴۰ (Bq/L)	توریم- ۲۳۲ (Bq/L)	رادیوم- ۲۲۶ (Bq/L)	شناسه‌ی منطقه‌ی موردنظر	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	شناسه‌ی نمونه
۱۴۸,۵۸±۲,۴۰	۱,۸۷±۰,۲۶	۲,۶۷±۰,۱۱	Chabahar Seaport(Pasabandar)	۶۱,۴۹	۲۵,۰۰	OMN02W002
۱۳۲,۶۰±۲,۱۴	۱,۸۰±۰,۲۴	۲,۱۹±۰,۱۱	Chabahar Seaport(Baris Bala)	۶۱,۲۲	۲۵,۰۰	OMN02W003
۱۳۵,۶۳±۲,۳۲	۱,۷۵±۰,۲۵	۲,۲۳±۰,۱۱	Pi Bashk(Derak)	۵۹,۲۸	۲۵,۳۰	OMN02W017
۱۴۴,۳۷±۲,۳۳	۱,۹۰±۰,۲۵	۲,۶۱±۰,۱۲	Pi Bashk(Sadich)	۵۸,۷۵	۲۵,۴۳	OMN02W022
۱۴۶,۷۶±۲,۳۰	۲,۰۸±۰,۱۹	۲,۷۰±۰,۰۸	Jask Seaport	۵۷,۲۸	۲۵,۸۴	OMN02W032



مناسی برخوردار نبودند، پس از تبدیل به فایل‌های با پسوند XYZ، با استفاده از قابلیت‌های مدل دیگری به نام MIKE 2000، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نقاط ژرفاسنجی که از سایر نقاط دورتر بوده و در مدل MIKE 2000 سبب برازش نادرست می‌شدند، حذف شدند. با توجه به داده‌های باد موجود در مرزهای غربی، شرقی و جنوبی هر شبکه، مرز داده‌های ژرفاسنجی نیز بر مبنای مختصات داده‌های باد تعیین و سایر نقاط ژرفاسنجی حذف شد. در نهایت با استفاده از مدل MIKE 2000، یک شبکه‌ی منظم از اطلاعات ژرفاسنجی تهیه شد. در محیط نرم‌افزار MATLAB، این شبکه‌ی منظم ژرفاسنجی، به داده‌های مناسب برای ورود به مدل تبدیل شدند. یک نمونه از فایل تبدیل شده در شکل ۴ داده شده است. اطلاعات ژرفاسنجی به صورت فایل‌های مجزا و مربوط به هر کدام از شبکه‌های قید شده بودند [۱۴].



شکل ۳. یک نمونه از گل موج به کار گرفته شده در مدل که تبدیل یافته‌ی خروجی مدل WAVEWATCH III است.



شکل ۴. یک نمونه فایل اطلاعات ژرفاسنجی تبدیل شده به داده‌های مناسب برای ورود به مدل.

۴. داده‌های میدانی مورد نیاز مدل

شبیه‌سازی پارامترهای موج در هر شبکه‌ی مجزا مستلزم داده‌های ژرفاسنجی و باد در همان شبکه است [۱۱]. از داده‌های باد تدقیق شده به وسیله‌ی مرکز اروپایی پیش‌بینی هوای برد متوسط^(۲) (ECMWF) به عنوان داده‌های باد ورودی به مدل سوآن استفاده شد [۱۲، ۱۳]. در این رابطه، ۸۶ فایل از خروجی‌های مدل WAVEWATCH III، از سازمان بنادر و دریانوردی ایران تهیه شد. این اطلاعات مربوط به بازه‌ی زمانی ۳۰ مارس تا ۳۱ مه سال ۲۰۱۱ میلادی، ثبت شده در بازه‌های زمانی ۳ ساعت، بودند. از میان این فایل‌ها، ۹ فایل به عنوان داده‌های تدقیق شده‌ی باد در مرکز هر کدام از شبکه‌ها به کار گرفته شدند [۶]. چون تعداد کافی از داده‌های باد در کل مساحت هر شبکه وجود نداشت، به منظور حفظ دقت در داده‌های ورودی، سلول تعریف شده برای باد در این شبکه، تنها دارای یک مش در راستای E (طول جغرافیایی) بود. طول این سلول، برابر تفاضل ابتدا و انتهای شبکه‌ی موردنظر در راستای E بود. به دلیل مناسب نبودن خروجی‌های مدل WAVEWATCH III به عنوان داده‌های باد، برای ورود به مدل موردنظر، تنها داده‌های سرعت و جهت باد در این خروجی‌ها انتخاب و پس از تبدیل به مؤلفه‌هایشان در راستای X و Y، به صورت فایل‌های متن برای ورود به مدل آماده شدند. به منظور تعریف طیف‌های پارامتری در مرزهای شرقی، غربی و جنوبی هر کدام از شبکه‌ها، ۲۷ فایل از خروجی‌های مدل WAVEWATCH III مورد استفاده قرار گرفت. برای تبدیل این خروجی‌ها به شرایط مرزی مناسب، از رسم گل موج‌ها استفاده شد. این گل موج‌ها، بهترین معیار برای تعیین Hs (ارتفاع مؤثر)، Tp (دوره‌ی تناوب موج) و DIR (جهت موج) هستند. انتخاب Hs، بر مبنای بلندترین ارتفاع موج در گل موج موردنظر و فراوانی آن بود. انتخاب DIR، بر مبنای جهت مرتفع‌ترین و فراوان‌ترین گل موج برگزیده در انتخاب Hs انجام شد. برای انتخاب Tp، از داده‌های مربوط به خروجی مدل WAVEWATCH III استفاده شد. با توجه به رابطه‌ی میان Hs و Tp، منحنی Hs برحسب Tp در هر شبکه رسم و با برازش مناسب و تعیین ضریب‌ها، Tp تعیین شد. بنابراین از مقادیر تعیین شده برای Hs، Tp و DIR، در تعریف شرایط مرزی استفاده شد. شکل ۳، یک نمونه از گل موج‌هایی را که نتیجه‌ی تبدیل این خروجی‌ها است، نشان می‌دهد. چون اطلاعات ژرفاسنجی تهیه شده از سازمان جغرافیایی کشور برای ورود به مدل، از شکل

**۵. توصیف مدل سوآن**

کوچک، معادله‌ی فوق ممکن است در دستگاه کارترین بیان شود که چنین است

$$\frac{\delta}{\delta t} N + \frac{\delta}{\delta x} C_x N + \frac{\delta}{\delta y} C_y N + \frac{\delta}{\delta \sigma} C_\sigma N + \frac{\delta}{\delta \theta} C_\theta N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (۴)$$

که در آن C_x و C_y ، سرعت‌های انتشار در فضاهای x و y هستند. در آب‌های کم‌عمق، σ فرایند در S سهم دارند

$$S_{tot} = S_{in} + S_{n13} + S_{n14} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (۵)$$

این عبارت‌ها، به ترتیب، نمایان‌گر رشد موج توسط باد، انتقال غیرخطی انرژی موج در اندرکنش سه‌گانه و چهارگانه‌ی موج، اتلاف از طریق ایجاد سفیدک در رأس موج، اصطکاک کف و شکست موج ناشی از تغییرات عمق هستند. در این پژوهش از نسخه‌ی ۴۰،۵۱AB مدل سوآن استفاده شد [۱۷].

۱.۵ تنظیمات مدل و فرایند شبیه‌سازی

با توجه به بحث‌های انجام شده، مهم‌ترین پارامتر در میان همه‌ی پارامترهای خروجی این مدل، جهت میانگین موج است که با نواحی با غلظت پرتوایی بالاتر، هم‌راستا می‌باشد. با در نظر گرفتن چنین معیاری، تنظیم‌های مدل انجام شد [۴]. برای شبیه‌سازی پارامترهای موج، مدل در حالت دو بعدی و در وضعیت ناپایا به کار گرفته شده و مختصات کروی برای آن انتخاب شد [۵، ۱۴]. به منظور دست‌یابی به اطلاعات دقیق پارامترهای موج شبیه‌سازی شده، مدل برای هر کدام از ۹ شبکه، به صورت مجزا به کار گرفته شد. جزییات هر کدام از شبکه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. قدرت تفکیک فضایی برای ۱۰ جهت انتخاب شده و با توجه به این که فضای زاویه‌ای تمام ۳۶۰ درجه را پوشش می‌داد، فضای زاویه‌ای به ۳۶ قسمت مساوی تقسیم شد. فضای بسامدی نیز به ۲۴ قسمت لگاریتمی، بین ۰،۴۱۸ و ۰،۴۱۱۷ هرتز، تقسیم شد. این به این معنا است که کم‌ترین دوره‌ی تناوب موج‌های سطحی شبیه‌سازی شده در دریای عمان، ۲،۴۲۸ ثانیه و بیش‌ترین آن ۲۳،۹۲۳۴ ثانیه بود [۱۸]. گام زمانی محاسبات در هر شبکه، ۲ دقیقه انتخاب شد.

برای شبیه‌سازی پارامترهای موج، از مدل سوآن استفاده شد. این مدل، یک مدل موج نسل سوم است که به منظور برآورد پارامترهای موج در نواحی ساحلی (کم عمق) به کار گرفته می‌شود [۵، ۱۵]. این مدل بر مبنای معادله‌ی تعادلی کنش موج^(۳) در نبود جریان، همراه با در نظر گرفتن چشمه‌ها^(۴) (منابع فزاینده‌ی انرژی موج) و چاهک‌ها^(۵) (منابع کاهنده‌ی انرژی موج) بنا شده است. از آنجایی که در حضور جریان‌ها چگالی کنش، بر خلاف چگالی انرژی، پایسته است، در مدل سوآن از طیف چگالی کنش استفاده می‌شود. چگالی کنش چنین تعریف می‌شود

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (۲)$$

که در آن $E(\sigma, \theta)$ ، چگالی انرژی با بسامد نسبی σ (بسامد زاویه‌ای که در دستگاه مختصات متحرک با سرعت جریان مشاهده می‌شود) و جهت انتشار θ (جهت عمود بر تاج موج در هر مؤلفه‌ی طیف) است. تغییرات N از معادله‌ی تعادلی کنش طیفی پیروی کرده و چنین است [۱۶]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (۳)$$

سمت چپ معادله، بخش سینماتیک معادله است. اولین جمله در سمت چپ این معادله، نرخ کلی تغییرات چگالی کنش با زمان را نشان می‌دهد. عبارت دوم، انتشار انرژی موج در فضای جغرافیایی x را نشان می‌دهد که در آن c_g سرعت گروه بوده و از رابطه‌ی پاشندگی آب‌های کم‌عمق به دست می‌آید. عبارت سوم نشان‌دهنده‌ی تغییر بسامد نسبی به دلیل تغییرات در عمق و جریان‌های میانگین است. عبارت چهارم، شکست یا پیچش ناشی از عمق و جریان را نشان می‌دهد. کمیت‌های c_σ و c_θ ، سرعت انتشار در فضای طیفی (σ, θ) هستند. سمت راست معادله در بردارنده‌ی چشمه‌ها و چاهک‌ها بوده و نمایان‌گر همه‌ی فرایندهای فیزیکی‌ای است که سبب ایجاد، از بین رفتن و یا بازتوزیع انرژی موج می‌شود. معادله‌ی (۳) را می‌توان در مختصات کارترین یا کروی بازنویسی کرد. برای مقیاس‌های



جدول ۲. موقعیت و مبدأ ۹ شبکه‌ی محاسباتی به همراه اندازه و تعداد مش‌ها در هر شبکه

نام شبکه	موقعیت مبدأ شبکه در راستای (°)E	موقعیت مبدأ شبکه در راستای (°)N	موقعیت انتهای شبکه در راستای (°)E	موقعیت انتهای شبکه در راستای (°)N	اندازه‌ی مش‌ها در هر دو راستا (°)	تعداد مش‌ها در راستای E	تعداد مش‌ها در راستای N
۸۶۰۰	۶۱٫۲۵	۲۴٫۷۳	۶۱٫۶۲۵	۲۵٫۱۸	۰٫۰۰۷۵	۵۰	۶۰
۸۶۰۱	۶۰٫۸۷۵	۲۴٫۸	۶۱٫۲۵	۲۵٫۲۵	۰٫۰۰۷۵	۴۹	۶۰
۸۶۰۲	۶۰٫۲۵	۲۴٫۹۵	۶۰٫۵	۲۵٫۴۴	۰٫۰۰۵	۵۰	۹۸
۸۶۰۳	۵۹٫۵	۲۴٫۹۱	۵۹٫۸۷۵	۲۵٫۴۵	۰٫۰۰۷۵	۵۰	۷۲
۸۶۰۴	۵۹٫۱	۲۴٫۹۴۴	۵۹٫۵	۲۵٫۴۸	۰٫۰۰۸	۶۰	۶۷
۸۶۰۵	۵۸٫۵	۲۴٫۹۴	۵۸٫۸	۲۵٫۶	۰٫۰۰۶	۵۰	۱۱۰
۸۶۰۶	۵۷٫۸۷۵	۲۵٫۱۰	۵۸٫۲۵	۲۵٫۷۰	۰٫۰۰۷۵	۵۰	۸۰
۸۶۰۷	۵۷٫۳۷۵	۲۵٫۲۰	۵۷٫۸۷۵	۲۵٫۷۷	۰٫۰۰۵	۱۰۰	۱۱۴
۸۶۰۸	۵۶٫۹	۲۵٫۲۹	۵۷٫۳۷۵	۲۶٫۰۵	۰٫۰۰۹۵	۵۴	۸۰

برای مدل تبدیل [۲۲] و با توجه به مختصات ۳ نقطه‌ی واقع در مرزهای غربی، شرقی و جنوبی هر شبکه، با استفاده از قابلیت‌های مدل MIKE 2009، به داده‌هایی در قالب یک ماتریس مستطیلی منظم تبدیل شده و یک شبکه از داده‌های ژرفاسنجی به عنوان ورودی به مدل سوآن را تشکیل دادند. یکی از دلیل‌های اصلی انجام این تبدیل، انطباق شرایط مرزی مسئله بر حل معادله‌ی ۴ بود. با توجه به توضیحات ارائه شده، دستور BOUNDSPEC برای تعریف طیف پارامتری در مرزهای هر شبکه به کار گرفته شد [۱۷]. هر کدام از مرزهای اختیار شده، یک ضلع کامل از هر شبکه‌ی محاسباتی بود و همه‌ی مرزهای شمالی نیز به خشکی ختم شدند. تنها مؤلفه‌های وارد شونده از این نقاط (که به عنوان شرایط مرزی بر روی مرزهای غربی، شرقی و جنوبی قرار داشتند) به درون هر شبکه، در محاسبات مؤثر بوده و توسط مدل به کار گرفته شدند. بنابراین، پارامترهای طیفی مربوط به هر کدام از خروجی‌های WAVEWATCH III که بر روی مرزهای (غربی، شرقی و جنوبی)، یک شبکه قرار داشتند استخراج شده و برای شرایط مرزی مسئله به کار گرفته شدند [۲۳، ۲۴]. پارامترهای خروجی که ساعت به ساعت برآورد شده و در پایگاه اطلاعاتی مدل ذخیره می‌شدند، شامل ارتفاع مؤثر موج برحسب متر، دوره‌ی تناوب مطلق میانگین موج برحسب ثانیه، دوره‌ی تناوب قله‌ی طیف چگالی واریانس (طیف بسامد نسبی) برحسب ثانیه، جهت میانگین موج برحسب درجه و جهت قله‌ی موج برحسب درجه بودند. خروجی‌های این مدل براساس تاریخ ۲۳ آوریل ۲۰۱۱ محاسبه شدند و به منظور دستیابی به مؤثرترین محاسبات، گام زمانی ۲ دقیقه برای انجام شبیه‌سازی به کار گرفته شد [۴].

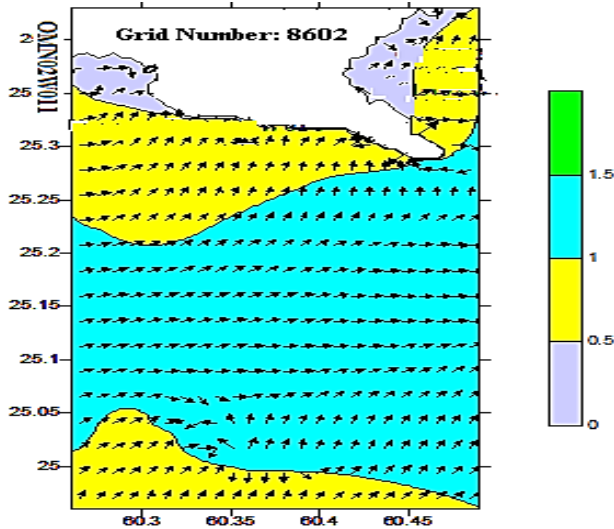
برای انجام محاسبات با استفاده از مدل و با در نظر گرفتن ورودی‌های باد، انتقال غیرخطی انرژی موج در اندرکنش‌های چهارگانه‌ی موج و اتلاف از طریق ایجاد سفیدک در رأس موج در نظر گرفته شد. اندرکنش‌های سه‌گانه در نظر گرفته نشدند. برای تعیین مقادیر اولیه در محاسبات ناپایا، گزینه‌های فرضی خود مدل به کار گرفته شدند [۵، ۱۴]. هم‌چنین برای شکست موج ناشی از کاهش عمق، پارامتر ثابت، برای اصطکاک بستر، معادلات مادسن [۱۹]، برای پدیده‌ی ایجاد سفیدک در رأس موج، معادلات جانسن [۲۰] و در مورد انرژی ورودی باد، تنها از رشد نمایی استفاده شد. استفاده از مدل، بدون در نظر گرفتن جریان انجام شد [۴]. اولین گام در انجام فرایند شبیه‌سازی، تعریف یک ناحیه‌ی محاسباتی است که شرایط موج باید در آن ناحیه شبیه‌سازی شود. این شبکه‌های محاسباتی طراحی شده، نیازمند تفکیک‌پذیری بالا برای انطباق با اطلاعات ژرفاسنجی در آب‌های کم‌عمق است تا شبیه‌سازی امواج ساحلی در این شبکه‌های محاسباتی با بالاترین دقت انجام شود [۴]. موقعیت مبدأ هر کدام از شبکه‌های محاسباتی، اندازه مش‌ها در هر شبکه و هم‌چنین تعداد مش‌های موجود در هر شبکه در جدول ۲ داده شده است [۲۱]. پس از طراحی شبکه‌های محاسباتی، استفاده از مدل نیازمند ورودی‌های باد و اطلاعات ژرفاسنجی بود. میدان باد هر شبکه که به عنوان یکی از ورودی‌ها به مدل معرفی شد، مربوط به مرکز هر شبکه بود. همان‌گونه که پیش از این گفته شد، این داده‌ها از سازمان بنادر و دریانوردی ایران تهیه شد. داده‌های ژرفاسنجی که یکی دیگر از ورودی‌های مورد نیاز این مدل بودند، از سازمان جغرافیایی ایران تهیه شدند. داده‌های ژرفاسنجی، در محیط MATLAB به داده‌های ورودی مناسب

۶. یافته‌ها و بحث

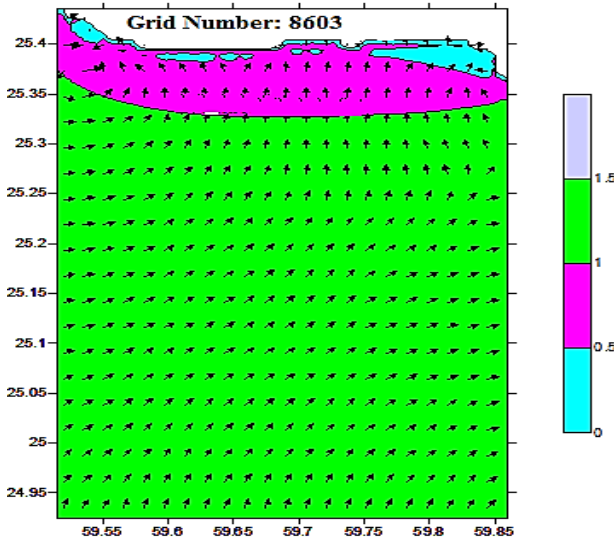
به منظور دستیابی به توزیع فضایی پارامترهای موج و همچنین برآورد پخش هسته‌های پرتوزا، از پایگاه اطلاعاتی تولید شده به وسیله مدل استفاده شد [۴]. نقشه‌های توزیع فضایی ارتفاع مؤثر موج و جهت میانگین موج (DIR و Hs) در هر شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته و به صورت نقشه‌های برجسته^(۶) در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. برای توصیف پخش هسته‌های پرتوزا، نقاط نمونه برداری در گستره‌ی سواحل شمالی دریای عمان به همراه غلظت پرتوزایی آن‌ها نیز در این شکل‌ها نمایش داده شده‌اند. مسیر انتشار هسته‌های پرتوزای طبیعی با بردارهای برتر موج جفت شده و در صورت رخداد هر گونه آلودگی دریایی، این جهت‌های برتر موج، در افزایش یا کاهش انتشار آلودگی در هر شبکه سهم داشته و در نهایت، این فرایند به عنوان عامل انتشار قلمداد شد [۲۵]. برخی از نتایج مهمی که از ترکیب غلظت‌های هسته‌های پرتوزا و نقشه‌های برجسته‌ی جهت برتر موج، استخراج شد، در ادامه ارائه شده است.

(الف)

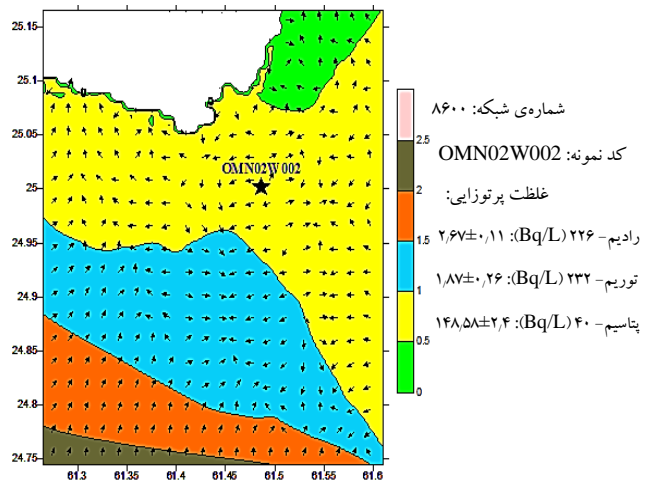
(ج)



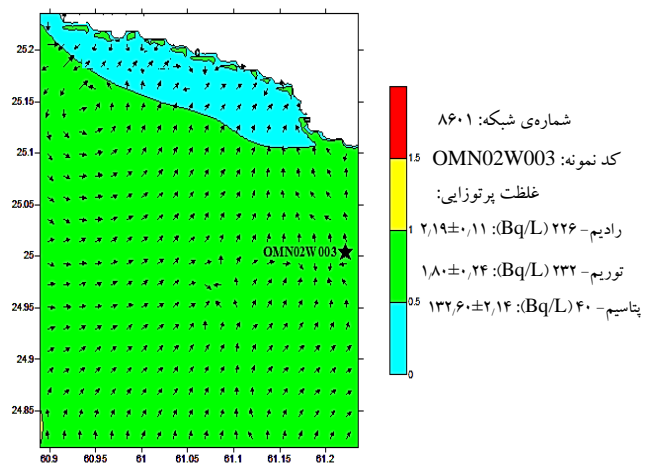
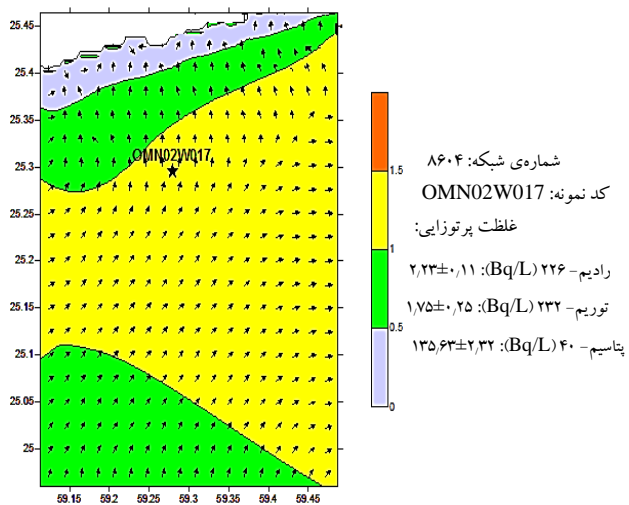
(د)



(ر)



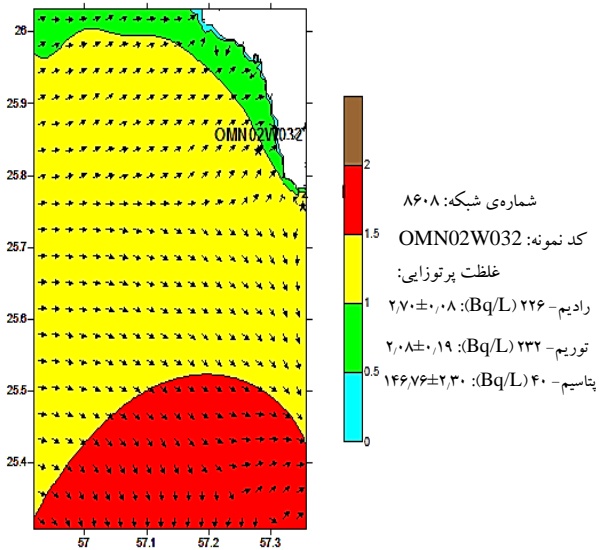
(ب)



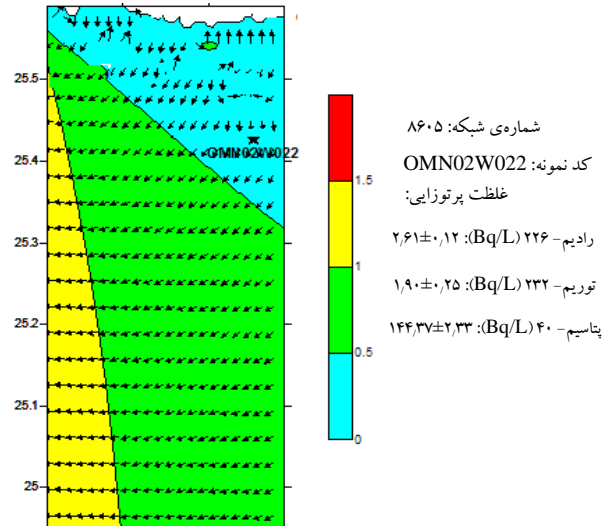
شکل ۵. نقشه‌ی برجسته‌ی ارتفاع مؤثر موج و جهت میانگین موج در شبکه‌های مختلف، به همراه نقطه‌ی نمونه برداری و غلظت هسته‌های پرتوزا در این شبکه‌ها.



(د)

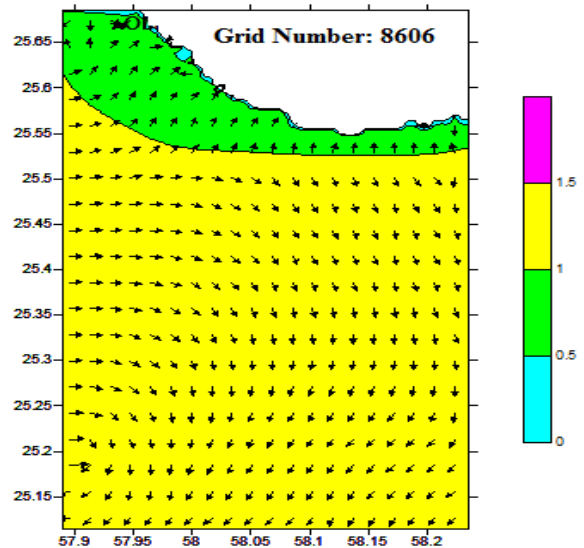


(الف)



شکل ۶. نقشه‌ی برجسته‌ی ارتفاع مؤثر موج و جهت میانگین موج در شبکه‌های مختلف، به همراه نقطه‌ی نمونه برداری و غلظت هسته‌های پرتوزا در این شبکه‌ها.

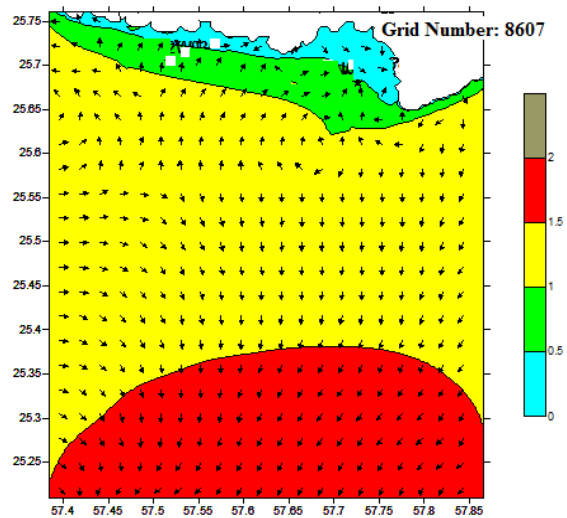
(ب)



۱.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۰

خروجی‌های مدل، شامل ارتفاع موج و جهت میانگین موج به همراه نقطه‌ی نمونه برداری، OMN02W002، در شکل ۵. الف مشخص شده‌اند. در حوالی نقطه‌ی نمونه برداری، نابسامانی در جهت میانگین موج دیده می‌شود و جهت برتری برای امواج این شبکه متصور نیست. یکی از دلایل اصلی این نابسامانی، ارتباط این ناحیه از دریای عمان با اقیانوس هند از طریق مرز باز شرقی و جنوبی است. اما نکته‌ی مهم در این شبکه این است که در مرزهای شرقی، غربی و جنوبی این شبکه، جهت برتر موج به سمت داخل این شبکه است. بنابراین، پیش‌بینی انتشار آلودگی بر این اساس بود که اگر آلودگی در شبکه‌های هم‌جوار وجود داشت، با شرط حفظ پیوستگی جهت برتر موج در شبکه‌های مجاور و در مرز شبکه‌ها (جهت برتر غرب به شرق)، آلودگی به داخل این شبکه انتشار می‌یافت. بنابراین با شرط پیوسته بودن جهت برتر موج در شبکه‌های غربی مجاور این شبکه و در مرزهای مشترک (جهت برتر غرب به شرق)، باید نسبت به سایر نقاط درون- دریایی غلظت پرتوزایی بالاتری داشته باشد که این گونه نیز بود. غلظت عناصر پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در آب‌های سطحی این شبکه، به ترتیب، برابر $۲,۶۷\pm ۰,۱۱$ ، $۱,۸۷\pm ۰,۲۶$ و $۱۴۸,۵۸\pm ۲,۴$ بکرل بر لیتر بود. در ارتباط با پایش

(ج)





هم‌چنین با در نظر گرفتن جهت برتر موج در ورود به این فرورفتگی (جهت برتر شمال)، غلظت پرتوزایی در این نقطه‌ها بالا خواهد بود و انتظار می‌رود که این نقطه‌های ساحلی، دارای بالاترین غلظت پرتوزایی در کل سواحل دریای عمان باشند [۴]. در این شبکه، جهت برتر موج در مرز غربی و شرقی و هم‌چنین در درون شبکه‌ی ۸۶۰۲، به سمت شرق است. لذا، انتشار آلودگی در این شبکه و برای نقاط درون-دریایی، از غرب به شرق است.

۴.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۳

شکل ۶. د خروجی‌های مدل شامل ارتفاع موج و جهت میانگین موج در این شبکه را نشان می‌دهد. تأثیرپذیری غلظت پرتوزایی در این شبکه نیز ناشی از انتشار آلودگی در امتداد جهت برتر موج است. جهت برتر موج در این شبکه دقیقاً رو به شمال و شمال‌شرقی بوده و کاملاً به نواحی ساحلی ختم می‌شود. جهت برتر موج در مرز غربی، مرز شرقی و درون این شبکه به سمت شرق است. از این‌رو، انتشار آلودگی در این شبکه و برای نقاط درون-دریایی، از غرب به شرق است.

۵.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۴

خروجی‌های مدل (ارتفاع موج و جهت میانگین موج) به همراه نقطه‌ی نمونه برداری، OMN02W017، در شکل ۵. ر مشخص شده‌اند. جهت برتر موج در نواحی میانی این شبکه و در مرزهای غربی و شرقی آن، به سمت شرق است. بنابراین، با توجه به این که نقطه‌ی نمونه‌ی برداری این شبکه، در گروه نقاط درون-دریایی قرار دارد، پیش‌بینی انتشار آلودگی بر این اساس خواهد بود که اگر آلودگی در شبکه‌های مجاور و در نقاط درون-دریایی وجود داشته باشد، با وجود شرط پیوستگی جهت برتر موج در این مرزها و در ناحیه‌ی میانی، آلودگی به داخل این شبکه و از این شبکه به شبکه‌های مجاور که همان شبکه‌ی ۸۶۰۳ است، منتشر خواهد شد. توجه به این نکته نیز ضروری است که با توجه به توضیحات داده شده، غلظت پرتوزایی در این نقطه باید نسبت به نقطه‌ی درون-دریایی OMN02W002، خیلی پایین‌تر بوده و نسبت به نقطه‌ی درون-دریایی دیگر، یعنی OMN02W003، پایین‌تر باشد. ولی از آن‌جایی که نقطه‌ی نمونه برداری OMN02W017 نسبت به نقطه‌ی نمونه برداری OMN02W003،

پیوستگی جهت برتر موج در مرز شبکه‌ها و نحوه‌ی انتشار آلودگی در میان شبکه‌ها، جهت برتر موج در مرز غربی این شبکه، مرز ارتباطی با شبکه‌ی ۸۶۰۱ به سمت شرق است.

۲.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۱

نقطه‌ی نمونه برداری در این شبکه، OMN02W003 است. مانند مورد شبکه‌ی ۸۶۰۰، خروجی‌های مدل، در شکل ۶. ب مشخص شده‌اند. مشاهده می‌شود که آشفتگی جهت برتر موج در این نقطه‌ی نمونه برداری در مقایسه با نقطه‌ی نمونه برداری شبکه‌ی ۸۶۰۰ خیلی کم‌تر است به گونه‌ای که می‌توان جهت برتر موج در این شبکه و هم‌چنین در مرز شرقی این شبکه را به سمت شرق در نظر گرفت. بنابراین، با توجه به این که نقطه‌ی نمونه برداری در گروه نقاط درون-دریایی قرار دارد، پیش‌بینی انتشار آلودگی بر این اساس خواهد بود که اگر آلودگی در شبکه‌های مجاور و در نقاط درون-دریایی وجود داشته باشد، با شرط پیوستگی جهت برتر موج در مرز شبکه‌ها و در درون شبکه (جهت برتر غرب به شرق)، آلودگی به درون این شبکه و از این شبکه به شبکه‌ی ۸۶۰۰ منتشر خواهد شد. بنابراین نقطه‌ی نمونه برداری این شبکه باید غلظت پرتوزایی پایین‌تری نسبت به نقطه‌ی نمونه برداری شبکه‌ی ۸۶۰۰، که آن هم یک نقطه‌ی درون-دریایی است، داشته باشد که این گونه نیز است. بنابراین در بازه‌ی میان شبکه‌های ۸۶۰۱ و ۸۶۰۰، آلودگی در نواحی دورتر از ساحل (مناطق درون-دریایی) و در عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و کم‌تر از آن، از غرب به شرق منتشر می‌شود. غلظت عناصر پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در آب‌های سطحی نقطه‌ی OMN02W003، به ترتیب، برابر 1.8 ± 0.24 ، 2.19 ± 0.11 و 132.6 ± 2.14 بکرل بر لیتر بود. مشابه شبکه‌ی ۸۶۰۰ جهت برتر موج در مرز غربی این شبکه، مرز ارتباطی با شبکه‌ی ۸۶۰۲ و هم‌چنین در درون شبکه‌ی ۸۶۰۱، به سمت شرق است.

۳.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۲

خروجی‌های مدل در این شبکه، شامل ارتفاع موج و جهت میانگین موج در شکل ۵. ج مشخص شده‌اند. با توجه به این که برخی از مناطق ساحلی این شبکه در درون فرورفتگی ناحیه‌ی ساحلی بندر چابهار در منطقه‌ی کنارک محصور شده‌اند و



دقیقاً رو به شمال شرقی بوده و کاملاً به سواحل این شبکه ختم می‌شود ولی در محدوده‌ی نقاط درون- دریایی این شبکه، تمایل انتشار آلودگی به سمت جنوب است.

۸.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۷

شکل ۶. ج خروجی‌های مدل سوآن، شامل ارتفاع موج و جهت میانگین موج برای این شبکه را نشان می‌دهد. در این شبکه نیز تمایل انتشار آلودگی به سمت جنوب است.

۹.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۸

شکل ۶. د خروجی‌های مدل برای این شبکه را به همراه نقطه‌ی نمونه برداری، OMN02W032، نشان می‌دهد. این نقطه، ساحلی محسوب شده و جهت برتر موج پس از طی فاصله‌ای حدود ۰٫۳ درجه، که فاصله‌ی بسیار زیادی به حساب می‌آید، کاملاً به این نقطه ختم می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که این نقطه، علاوه بر پیروی از قوانین حاکم بر نقاط ساحلی، به دلیل ختم شدن جهت برتر موج به طرف آن، پس از طی چنین فاصله‌ی طولانی، دارای غلظت پرتوزایی بیش‌تری نسبت به سایر نقطه‌های ساحلی باشد که این‌گونه نیز است. غلظت عناصر پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در آب‌های سطحی نقطه‌ی OMN02W032، به ترتیب، برابر $۲٫۷ \pm ۰٫۰۸$ ، $۲٫۰۸ \pm ۰٫۱۹$ و $۱۴۶٫۷۶ \pm ۲٫۳۳$ بکرل بر لیتر بود. در حوالی این نقطه، یعنی در عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۲۵٫۷ درجه، تمایل انتشار آلودگی به سمت شرق بوده و در ناحیه‌ی پایین این شبکه، یعنی در عرض‌های جغرافیایی کم‌تر از ۲۵٫۷ درجه، تمایل انتشار آلودگی به سمت جنوب است.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف مدیریت سریع حوادث و رخداد‌های ناشی از رهاسازی عناصر پرتوزا در محیط‌های آبی، به بررسی مناطقی که به عنوان نماینده برای نمونه برداری از آب‌های سطحی سواحل شمالی دریای عمان معرفی می‌شوند، پرداخته شد. این نقاط پس از تلفیق نتایج تحلیل پرتوزایی نمونه‌های آب‌های سطحی حجم- بالا و نقشه‌ی برجسته‌ی جهت‌های برتر موج در هر شبکه، که از نتایج شبیه‌سازی با مدل سوآن استخراج شدند، ارائه شدند [۲]. اساس پیش‌گویی انتشار آلودگی با روش

حدود ۰٫۳ درجه به ساحل نزدیک‌تر است، بالاتر بودن غلظت آن نسبت به نقطه‌ی نمونه برداری OMN02W003، قابل توجیه است. غلظت عناصر پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در آب‌های سطحی نقطه‌ی OMN02W017، به ترتیب، برابر $۲٫۳۳ \pm ۰٫۱۱$ ، $۱٫۷۵ \pm ۰٫۲۵$ و $۱۳۵٫۶۳ \pm ۲٫۳۲$ بکرل بر لیتر بود. با توجه به نتایج ارائه شده در بازه‌ی شبکه‌ی ۸۶۰۰ تا شبکه‌ی ۸۶۰۴، انتظار می‌رود که اگر آلودگی پرتوزا در این بازه و در محدوده‌ی نقاط درون- دریایی قرار داشته باشد، این آلودگی به سمت شرق و تا شبکه‌ی ۸۶۰۰ انتشار یابد.

۶.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۵

خروجی‌های مدل (ارتفاع موج و جهت میانگین موج) به همراه نقطه‌ی نمونه برداری، OMN02W022، در شکل ۶. الف نشان داده شده‌اند. لبه‌ی غربی شبکه‌ی ۸۶۰۴ دارای جهت موج برتر به سمت شرق است ولی جهت موج برتر لبه‌ی شرقی شبکه‌ی ۸۶۰۵ به سمت غرب است و بنابراین، از این شبکه، پیوستگی جهت برتر موج (غرب به شرق) از بین می‌رود. در این شبکه، جهت برتر موج، به سمت غرب است. نقطه‌ی نمونه برداری OMN02W022 نمی‌تواند یک نقطه‌ی کاملاً درون- دریایی محسوب شود ولی تا حدودی می‌تواند از قوانین حاکم بر نقاط درون- دریایی پیروی کند و علاوه بر این می‌تواند یک نقطه‌ی ساحلی نیز باشد. غلظت عناصر پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در آب‌های سطحی نقطه‌ی OMN02W022، به ترتیب، برابر $۲٫۶۱ \pm ۰٫۱۲$ ، $۱٫۹ \pm ۰٫۲۵$ و $۱۴۴٫۳۷ \pm ۲٫۳۳$ بکرل بر لیتر بود. در ارتباط با پایش نحوه‌ی انتشار آلودگی در میان شبکه‌ها، اگر آلودگی در این شبکه وجود داشته باشد، انتشار آن به سمت شرق نخواهد بود بلکه تمایل فراوانی به انتشار در راستای جنوب خواهد داشت.

۷.۶ شبکه‌ی ۸۶۰۶

خروجی‌های مدل (ارتفاع موج و جهت میانگین موج) برای این شبکه در شکل ۶. ب داده شده‌اند. نظم خاصی در جهت موج‌های برتر رسیده به این نواحی دیده می‌شود. جهت برتر موج در حوالی نقطه‌های ساحلی، از فاصله‌ی حدود ۰٫۱ درجه قبل از این نقطه‌ها تا ساحل، که فاصله‌ی نسبتاً زیادی هم محسوب می‌شود،



مطابق با قانون‌ها و نتیجه‌های ارایه شده، در شرایط نشت آلودگی پرتوزا در سواحل شمالی دریای عمان، اگر منشأ آلودگی در فاصله‌ی مکانی بین شبکه‌های ۸۶۰۰ تا ۸۶۰۴ قرار گرفته باشد، این آلودگی در شبکه‌ی ۸۶۰۰ تجمع پیدا خواهد کرد و این شبکه محل مناسبی برای نمونه برداری از آب‌های سطحی است. از طرف دیگر، اگر منشأ آلودگی در فاصله‌ی مکانی بین شبکه‌های ۸۶۰۵ تا ۸۶۰۸ قرار گرفته باشد، این آلودگی به سمت بخش میانی دریای عمان و متمایل به جنوب این دریا سوق پیدا خواهد کرد. پخش آلودگی پرتوزای ناشی از رهاسازی مواد پرتوزای قابل انحلال در آب و با نیم- عمرهای کوتاه (نه آنقدر کوتاه که تغییرات غلظت ناشی از پخش در مدت زمان معین تحت تأثیر قرار گیرد) در نقاط معینی از ساحل‌های شمالی دریای عمان و ردیابی آن به وسیله‌ی روش ارایه شده، قابل ارزیابی دقیق‌تر است.

تشکر و قدردانی

پژوهش موردنظر با حمایت‌های شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی (وابسته به سازمان انرژی اتمی ایران) و هم‌چنین پژوهشکده اکتولوژی خلیج فارس و دریای عمان (مطابق با قرارداد شماره ۹۰/۰۳۰۷، فی مابین این شرکت و دانشگاه اصفهان) به انجام رسیده است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از سازمان بنادر و دریانوردی و هم‌چنین سازمان جغرافیایی جمهوری اسلامی ایران، به منظور همکاری در ارایه داده‌های دقیق باد و داده‌های ژرفانسنجی تشکر و قدردانی نمایند. هم‌چنین تشکر ویژه از دایره‌ی تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان به عمل می‌آید. در پایان، از زحمات و راهنمایی‌های خانم مهندس ساناز مسیبی و آقای مهندس مهدی کمالی نیز تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

۱. Wave Model Simulating Waves Nearshore (SWAN)
۲. European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF)
۳. Wave Action Balance Equation
۴. Sources
۵. Sinks
۶. Contour Map

یاد شده بر این مبنا بوده است که جهت‌های برتر موج در هر شبکه به صورت مجزا بررسی شده و تحت شرایط پیوستگی این جهت‌ها در مرزهای مشترک شبکه‌های همسایه، انتشار آلودگی پرتوزای طبیعی در سواحل شمالی دریای عمان ردیابی شد. همه‌ی آنچه که در این بررسی‌ها قابل توجه بود، این است که:

- (۱) پارامترهای مؤثر در تغییر غلظت پرتوزایی، با توجه به اولویت، به صورت زیر هستند:
 - فاصله از ساحل (نقاط ساحلی غلظت بالاتری داشته و با دور شدن از ساحل، این غلظت کم‌تر خواهد شد)
 - عمق (عمق کم‌تر، غلظت بیش‌تر)
 - جهت برتر موج
- (۲) با نزدیک‌تر شدن به ساحل، به دلیل برقراری قانون‌های حاکم بر ساحل، غلظت پرتوزایی بیش‌تر می‌شود.
- (۳) در نواحی ساحلی، برای دو نقطه با عمق، ارتفاع بیشینه‌ی موج و عرض جغرافیایی تقریباً یکسان، نقطه‌ای که در راستای جهت برتر موج‌ها قرار دارد، غلظت پرتوزایی بیش‌تری را نشان می‌دهد.
- (۴) در نواحی ساحلی، برای دو نقطه با عمق، ارتفاع بیشینه‌ی موج و عرض جغرافیایی تقریباً یکسان، و هر دو در راستای جهت برتر امواج، نقطه‌ای که طول بردار (مسافت) برتر موج تا آن نقطه بیش‌تر باشد، دارای غلظت پرتوزایی بیش‌تری است.
- (۵) در یک عرض جغرافیایی باید غلظت‌های یکسانی وجود داشته باشد، مگر این‌که جهت برتر موج برای این نقاط یکسان نباشد.
- (۶) دسته‌بندی غلظت در مناطق ساحلی چنین است،
 - نقطه‌هایی که در راستای جهت برتر موج بوده و طول بردار آن‌ها بزرگ‌تر باشد، در رده‌ی اول غلظت قرار دارند.
 - نقطه‌هایی که در راستای جهت برتر موج بوده و طول بردار آن‌ها کوچک‌تر باشد، در رده‌ی دوم غلظت قرار دارند.
 - نقطه‌هایی که جهت برتر موج در حوالی آن‌ها بی‌نظم باشد، در رده‌ی سوم غلظت قرار دارند.



1. M.R. Zare, M. Mostajaboddavati, M. Kamali, M.R. Abdi, M.S. Mortazavi, ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations in marine sediments along the northern coast of Oman sea using high-resolution gamma-ray spectrometry, *Marine Pollution Bulletin*, 64(9) (2012) 1956–1961.
2. C. Duffa, H. Thebault, A radioecological risk assessment tool for post-accidental situations: application in the Toulon marine area (South of France), *Towards Convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe*, (2009).
3. Y. Li, Y. Jin, Y. Yin, H. Shen, X. Zhang, Sea Surface Simulation in Large Coastal Region for Maritime Simulators, *Fifth International Conference on Image and Graphics*, (2009).
4. A. Akpinar, M.I. Komurcu, Assessment of wave energy resource of the Black sea based on 15-year numerical hindcast data, *Applied Energy*, 101 (2013) 502-512.
5. E. Rusu, S.C. Guedes, Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore, *Renewable Energy*, 34 (2009) 1501–1516.
6. A. Saket, A. Shahidi, Wave energy potential along the northern coasts of the gulf of Oman, Iran, *Renewable Energy*, 40 (2012) 90-97.
7. F. Xu, W. Perrie, B. Toulany, C.P. Smith, Wind-generated waves in Hurricane Juan, *Ocean Modelling*, 16 (2007) 188–205.
8. L. Gorrell, B. Raubenheimer, E. Steve, R.T. Guza, SWAN predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry, *Coastal Engineering*, 58 (2011) 510–516.
9. R.J. De Meijer, I.C. Tanczos, C. Stapel, Radiometry as a technique for use in coastal research, *New Techniques in Continental Shelf research*. Geological Society Special Publications, 117 (1996) 289-297.
10. S.A. Talha, R.J. De Meijer, R. Lindsay, R.T. Newman, P.P. Maleka, I.N. Hlatshwayo, In-field radon measurement in water: a novel approach, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101 (2010) 1024-1031.
11. L.Q. Xu, X.D. Liu, L.G. Sun, H. Yan, Y. Liu, Y.H. Luo, J. Huang, Y.H. Wang, Distribution of radionuclides in the guano sediments of Xisha Islands, South China Sea and its implication, *Environmental Radioactivity*, 101 (2010) 362-368.
12. M.H. Moeini, A. Etemad-Shahidi, V. Chegini, Wave modeling and extreme value analysis off the northern coast of the Persian Gulf, *Applied Ocean Research*, 32 (2010) 209-218.
13. K. Gunwoo, M.J. Weon, S.L. Kwang, J. Kicheon, E.L. Myung, Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean Peninsula, *Energy*, 36 (2011) 1460-1469.
14. R.P. Signell, S. Carniel, L. Cavaleri, J. Chiggiano, J.D. Doyle, J. Pullen, M. Sclavo, Assessment of wind quality for oceanographic modelling in semi-enclosed basins, *Journal of Marine Systems*, 53 (2005) 217–233.
15. V. Alari, U. Raudsepp, T. Kouts, Wind wave measurements and modelling in Küdema Bay, Estonian Archipelago Sea, *Journal of Marine Systems*, 74 (2008) S30–S40.
16. J.M. Brown, A case study of combined wave and water levels under storm conditions using WAM and SWAN in a shallow water application, *Ocean Modelling*, 35 (2010) 215–229.
17. H.O. Shan, M.L. Jian, W.H. Tai, Y.T. Shiao, Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan, *Ocean Engineering*, 29 (2002) 947–971.
18. The SWAN team, SWAN user manual (Cycle III version 40.51AB). Delft: Delft University of Technology, (2007).
19. O.S. Madsen, Y.K. Poon, H.C. Graber, Spectral wave attenuation by bottom friction, In: *Theory, Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, (1988) 492–504.
20. P.A.E.M. Janssen, Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography*, 21 (1991) 1631–1642.



- 21.S.C. Hagen, O. Horstmann, R.J. Bennett, An Unstructured Mesh Generation Algorithm for Shallow Water Modeling, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 16 (2) (2002) 83–91.
- 22.E. Rusu, D. Conley, C.E. Ferreira, A hybrid framework for predicting waves and longshore currents, *Journal of Marine Systems*, 69 (2008) 59–73.
- 23.M. Zijlema, A.J. Van der Westhuysen, On convergence behaviour and numerical accuracy in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra, *Coastal Engineering*, 52 (2005) 237–256.
- 24.A.J.C. Crespo, G.M. Gómez, P. Carracedo, R.A. Dalrymple, Hybridation of generation propagation models and SPH model to study severe sea states in Galician Coast, *Journal of Marine Systems*, 72 (2008) 135–144.
- 25.E. Rusu, C.G. Soares, Wave energy pattern around the Madeira Islands, *Energy*, 45 (2012) 771-785.