

عملکرد مدل کوهیرنس (COHEHRENS) در مدل‌سازی پخش آلودگی در یک خلیج کم عمق تحت تاثیر کشند (خلیج بوشهر)

سیدطالب حسینی^۱، حسین فرجامی^{۲*} و سیدمهدی محمودی^۳

^۱ کارشناسی ارشد فیزیک دریا، موسسه ملی اقیانوس شناسی، مرکز اقیانوس شناسی خلیج فارس، بوشهر، ایران

^۲ کارشناسی ارشد فیزیک دریا، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

(دریافت: ۸۸/۱۰/۲۷، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۱/۱۹)

چکیده

خلیج بوشهر، خلیج کوچکی در امتداد سواحل شمالی خلیج فارس است که به خاطر ورود انواع آلاینده‌های صنعتی، آلودگی ناشی از تردد کشتی‌ها، وجود منابع آلاینده نفتی، تخلیه مواد زاید و سمی و فاضلاب‌های خانگی واردشونده به این خلیج تاثیر فراوانی بر آلودگی زیست‌محیطی حوضه خلیج فارس دارد. بنابراین نیاز مبرم به شناسایی و بررسی نحوه پخش این آلودگی‌ها، کاملاً مشهود است.

به این منظور در این تحقیق از مدل کوهیرنس که یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی چند منظوره است و برای آب‌های کرانه‌ای دریاها و فلات قاره‌ها طراحی شده؛ برای مدل‌سازی و بررسی آلودگی در خلیج بوشهر استفاده شده است. برای ورودی مدل، داده‌های ثبت شده ایستگاه هواشناسی دریایی بوشهر در یک دوره آماری ۴۰ ساله و چهار مؤلفه اصلی کشندی (جزر و مدی) (O_1, S_2, M_2) و (K_1) بندر بوشهر مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تنظیم مدل برای خلیج بوشهر و وارد کردن داده‌های مورد نیاز؛ مدل برای این خلیج اجرا شد که پس از رسیدن به حالت پایداری، جریان‌های کشندی با مشاهدات میدانی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و پیرو آن نحوه پخش آلودگی افقی در لایه‌های متفاوت پیش‌بینی شد.

نتایج مدل نشان می‌دهد که پخش آلودگی در خلیج بوشهر، تحت تاثیر جریان‌های اغلب کشندی این خلیج رخ می‌دهد و نتایج مربوط به میدان جریان هم‌خوانی خیلی خوبی با مشاهدات میدانی مربوط به حرکت شناورهای روی آب دارند. نتایج این مدل را می‌توان در نحوه پخش آلودگی و مسیر حرکت آلاینده در خلیج بوشهر و پیشنهاد راهکار مناسب برای مقابله با پخش بیشتر آن مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، پخش آلودگی، خلیج بوشهر، مدل کوهیرنس

Application of COHERENS in modeling pollution dispersion in a shallow tide-affected bay (Bushehr Bay)

Hosseini, S. T.¹; Farjami, H.²; Mahmodi, S. M.³

¹ M.Sc. in Physical Oceanography, Iranian National Institute for Oceanography, Persian Gulf Center for Oceanography, Bushehr, Iran

² M.Sc. in Physical Oceanography, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

³ M.Sc. in Physical Oceanography, Applied Meteorological Research Center of Bushehr, Iran

(Received: 17 Jan 2010, Accepted: 8 Feb 2011)

Abstract

It is well known that, contaminant transportation is a major problem in coastal zones and has to be faced when coastal structures are being planned.

Sea pollution not only causes environmental damage, but also impacts quality and

population of sea resources. Oil is the most important pollutant, pollutants emanating from industries, ships, drilling and exploration in the seabed, ship sewage, toxic waste dumping, and civic sewer systems.

Being alongshore the northern coasts of the Persian Gulf, Bushehr Bay is considered important in sea pollution due to the frequent sources of industrial and oil pollutants, ship transportation, and sewage and toxic waste dumping. Therefore, it is necessary to study and find the way the pollutants are dispersed along the bay. To do so, this study concentrates on physical and atmospheric factors affecting pollution dispersion.

Bingchen Liang (2008), surveyed a hydrodynamic sediment coupled model COHERENS-SED, which has been developed by the first two authors through introducing wave-enhanced bottom stress, wave dependent surface drag coefficient, wave-induced surface mixing, SWAN and sediment model to COHERENS, and is modified through introducing a contaminant transportation model. They showed that the fields of current velocity and contaminant concentration obtained by the modeling of case with wave-induced longshore current are quite different.

Using COHERENS, Mahmudi (1386) modeled pollution dispersion in the Persian Gulf. He proved that pollution dispersion in the Gulf is a function of flushing time and current movement at water surface and sea bottom.

Since Bushehr Bay is an important area from aspects of economy, marine transportation, and environment, there is a high potentiality to disperse the pollution in different ways. Due to the prevalence of the tidal current in the bay, this study uses COHERENS to simulate the horizontal dispersion of pollution affected by tidal currents in the bay.

Therefore, COHERENS, a hydrodynamic multipurpose 3D modeling system for coastal and shelf waters, has been used to model and survey dispersion of pollution in Bushehr Bay. The recorded data of the Marine Meteorology Station for a 40-year period, besides 4 major tidal components (M_2 , S_2 , O_1 , and K_1) of the bay were used as the inputs of the model. When the model was adjusted and the data inserted, the model was run for the bay. After the model reached a stability point, tidal currents were validated with field observation which resulted in prediction of horizontal dispersion of pollution in different layers.

The results show that dispersion is highly affected by tidal currents, and the results gained from the current field are in a good accordance with field observation of the bay. These results can be applied to predict the direction and dispersion of pollution and the ways to deal with them in the future.

Key words: Modeling, Pollution dispersion, Bushehr Bay, COHERENS.

۱ مقدمه

آب توازن، حفاری‌ها و اکتشافات نفتی است (محمودی، ۱۳۸۶).

از آنجا که خلیج بوشهر از لحاظ حمل و نقل کالا و به خصوص ترانزیت نفت دارای اهمیت ویژه‌ای است؛ احتمال پخش آلودگی در این منطقه از راه‌های گوناگون وجود دارد. از این رو داشتن مدلی که بتواند در صورت نشت مواد آلاینده به محیط دریایی این منطقه، مسیر

ورود انواع آلاینده‌های صنعتی، آلودگی ناشی از کشتی‌ها، حفاری و اکتشاف در بستر عمیق دریاها، تخلیه مواد زاید و سمی و پساب کشتی‌ها، فاضلاب‌های خانگی علاوه بر مشکلات زیست‌محیطی، بر کیفیت و جمعیت ذخایر دریایی‌ها اثرات منفی دارد و نفت مهم‌ترین منبع آلاینده دریاها است. منشأ حدود ۹۰ درصد آلودگی‌های نفتی، فعالیت‌های داخل دریا، اعم از تردد کشتی‌ها، تخلیه

شده می‌تواند درصدی از مواد فرار خود را، طی تبخیر در مدت چند ساعت از دست بدهد، به‌نحوی که تغییری در چگالی آن رخ دهد. حرکت لکه‌های نفتی شناور و خشی در آب‌های عمیق‌تر تحت تأثیر الگوهای رژیم گردش آب زیرسطحی است که البته این الگوها پیچیده و ناشناخته‌اند. برای برآورد حجم ریزش اولیه و یافتن یک معادله پخش لازم است که شعاع پخش یک ریزش نفتی فرضی را درحکم تابعی از زمان تعیین کنیم. برای ردگیری ریزش مورد نظر، سرعت و جهت باد، جریان‌های کِشندی ناحیه‌ای و رژیم گردش آب عمومی موجود در طول ساحل مورد نیاز است. همچنین برای پیش‌بینی بخشی از آن ریزش که ممکن است با ستون آب مخلوط شود، باید رژیم گردش آب عمومی توده آب را نیز در نظر گرفت (فای، ۱۹۷۱؛ موری و همکاران، ۱۹۷۰).

بنا به حجم نقل و انتقالات زیاد و پساب کشتی‌ها، تخلیه آب توازن و نیز فاضلاب شهری، احتمال وقوع آلودگی نفتی یا غیر نفتی در خلیج بوشهر زیاد است. لذا برای جلوگیری از فجایع زیست‌محیطی در این منطقه و موارد مشابه در آینده، لزوم پیش‌بینی نحوه پخش این آلاینده‌ها در این خلیج ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق تأکید بیشتر بر چگونگی انتشار آلاینده‌ها با توجه به عوامل فیزیکی و جوئی است. در زمینه پخش آلودگی در دریاها کارهای متعددی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

موری و همکاران (۱۹۷۰)، در محل چوتون (Chevton) در خلیج مکزیک با استفاده از یک مدل ریاضی و مجموعه‌ای از داده‌های نظری، مقایسه‌ای برای اعمال نیروهای اغتشاش در معادلات تعیین‌کننده میزان پخش نفت در دریا پرداخته‌اند (موری و همکاران، ۱۹۷۰). موری (۱۹۷۲)، سامانه ریزش نفتی را با استفاده از یک مدل سه‌بُعدی به نام دلفت (Delft-3D) در سواحل امارات، مدل‌سازی کرده است. در این مدل اثرات ناشی از

حرکت آلاینده و نحوه پخش آن را پیش‌بینی کند؛ امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

بانک جهانی در گزارشی درباره آلودگی‌های زیست‌محیطی در نواحی ساحلی ایران اعلام کرد که سالانه ۱/۲ میلیون بشکه نفت به خلیج فارس و دریای عمان نشت می‌کند که به موجب آن، این دریا به یکی از آلوده‌ترین محیط‌های آبی جهان تبدیل شده است. این میزان نشت آلاینده نفتی تقریباً حدود ۳ برابر دریای شمال و ۲ برابر دریای کارائیب است (برنامه محیط زیستی سازمان ملل، ۲۰۰۲).

حرکت یک آلودگی در آب دریا، به عوامل گوناگونی از جمله شرایط آب‌وهوایی مانند باد، دما و بارش، شرایط اقیانوسی کِشند، جریان‌ها و همچنین پارامترهای فیزیکی مواد تشکیل‌دهنده آلودگی، بستگی دارد. در مورد ریزش‌های آلاینده ناپیوسته‌ای که در شرایط باد خفیف رخ می‌دهند، مدل‌هایی وجود دارد که از آنها می‌توان در زمانی که بالاترین میزان پخش آلاینده وجود دارد استفاده کرد.

دو نوع از این مدل‌ها را موری و همکاران (۱۹۷۰) و فای (۱۹۷۱) بررسی کرده‌اند. در این بررسی پخش آلودگی، گرده‌های کوچک درحکم یک نیروی عامل، زمانی اهمیت می‌یابند که باد خفیف متمایل به باد قوی‌تر شود. بعد از انتشار آلاینده به بیشترین میزان شعاع پخش شدگی (تحت اثر پارامترهای فیزیکی خود آلاینده)، پخش آن در بیشتر آب‌های ساحلی، تحت تأثیر نیروهای باد و جریان‌های کِشندی قرار می‌گیرد. بنابراین انتقال آلودگی به‌منزله بُرداری که مجموع مولفه‌های جریان‌های کِشندی و تنش باد روی آلاینده را در بر می‌گیرد، محاسبه می‌شود. علاوه بر انتقال سطحی لکه‌های نفتی، امکان ماندگاری آلاینده و اختلاط عمودی آن با ستون آب را نیز باید در نظر گرفت. برای این منظور باید خصوصیات آلاینده ریخته شده را بدانیم. برای مثال نفت خام ریخته

باد و تبخیر مواد نفتی در چگونگی پخش مواد نفتی بررسی شده است (موری، ۱۹۷۲).

اداره هواشناسی فرانسه (میتسو فرانس) (Metea-France) یک پاسخ ریزش نفتی را برای پخش نفت به شکل سه‌بعدی شبیه‌سازی کرده است. این سامانه در هر جای دنیا و در هر زمانی قابل اجرا است. صحت این مدل در ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ با یک آلودگی ثبت شده و مشخص، بررسی شد و دو بار در یک زمان واقعی مورد آزمایش قرار گرفت (پاتریک و همکاران، ۱۹۹۹).

در یک گشت تحقیقاتی در منطقه دریایی راپمی (Ropme) اندازه‌گیری‌های میدانی در ۱۹۹۲ از فوریه تا ژوئن به انجام رسید و متغیرهای فیزیکی گوناگون در چند منطقه اندازه‌گیری شد. تأثیر این عوامل فیزیکی بر انتشار آلوده‌کننده نفتی تا حدودی بررسی شده است (رینولدز، ۱۹۹۳).

دیمیتار و همکاران (۲۰۰۶) مدل کوهیرنس را برای بررسی آلودگی بیژنوئوشیمی و انتقال آلودگی در سواحل ایتالیا (Sacca di Goro) عملیاتی و کالیبره نمودند و زمان ماندگاری را برای قسمت‌های مختلف این سواحل مورد بررسی قرار دادند (دیمیتار و همکاران، ۲۰۰۶).

بینگوچین و همکاران (۲۰۰۸)، آلودگی و انتقال رسوب را در خلیج یانگپو (Yangpu Bay) با به کار بردن نتایج مدل سوان و مدل کوهیرنس، مدل‌سازی کردند و نتایج تحقیق خود را با مشاهدات میدانی مورد مقایسه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که نتایج مدل با مشاهدات میدانی تفاوت‌هایی دارد (بینگوچین و همکاران، ۲۰۰۸).

محمودی (۱۳۸۶)، با استفاده از مدل کوهیرنس به مدل‌سازی پخش آلودگی در خلیج فارس پرداخته و روشن ساخته که پخش آلودگی در خلیج فارس در سطح و بستر، تابع حرکت جریان و زمان ماندگاری خلیج (محمودی، ۱۳۸۶).

از آنجا که خلیج بوشهر از جنبه‌های گوناگون

اقتصادی، حمل و نقل دریایی و مسائل زیست‌محیطی دارای اهمیت ویژه‌ای است بنابراین احتمال پخش آلودگی در این منطقه از راه‌های گوناگون زیاد است. چون غالب جریان‌ها در خلیج بوشهر جریان‌های کِشندی است، در این تحقیق با استفاده از مدل کوهیرنس به شبیه‌سازی پخش افقی آلودگی تحت اثر جریان‌های عمدتاً کِشندی این خلیج پرداخته شده است.

۲ روش کار

۱-۲ منطقه مورد بررسی

خلیج بوشهر، خلیج کوچکی در امتداد سواحل شمالی خلیج فارس و در شمال شبه‌جزیره بوشهر است که با توجه به نقشه هیدروگرافی مورد استفاده در این تحقیق، در منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۲۵×۱۶ کیلومتر مربع، از طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی تا ۵۰ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی و از عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی تا ۲۹ درجه و ۵ دقیقه و ۲۷ ثانیه شمالی کشیده شده است (شکل ۱). چنان‌که از شرق و شمال به جزیره شیف و اراضی پست و آبگیر شهرستان بوشهر محدود است. در جنوب شرق از طریق خورهای لشگری و سلطانی با بندر بوشهر در ارتباط است و از سمت غرب و جنوب غرب به دریا منتهی می‌شود (شکل ۲).

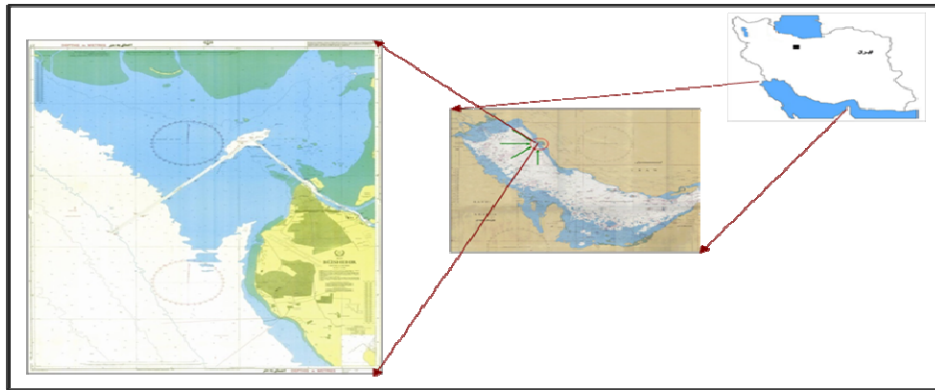
۲-۲ کِشند و باد غالب منطقه

شکل ۳ نمودار کِشند (Tide) را در خلیج بوشهر، طبق اندازه‌گیری‌های میدانی صورت گرفته نشان می‌دهد. طبق این نمودار و همچنین جدول‌های کِشندی موجود، کِشند در خلیج بوشهر مختلط مایل به نیم‌روزانه است (شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۷۹).

در حالت مه‌کِشند (Spring tide)، مقدار متوسط کِشند حدود $۱/۶$ متر و در حالت که کِشند (Neap tide) حدود ۱ متر است. بیشترین مقدار فراکِشند (High Tide) حدود ۲ متر است ولی تحت اثر بادهای غربی قوی و با

تشکیل می‌دهد (کلارک، ۱۹۸۲).
 شکل ۴، نمودارهای ستونی باد بوشهر را در دو فصل بهار و تابستان نشان می‌دهد. باد غالب در این نمودارها، باد غربی است. همچنین، با توجه به شکل ۵، باد غالب در نمودارهای ستونی فصل‌های پاییز و زمستان، باد شمال غربی است (مرکز تحقیقات کاربردی هواشناسی بوشهر، ۱۳۸۸).

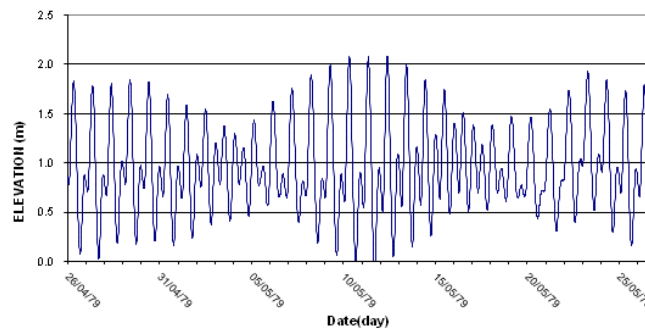
تداوم طولانی مقداری در حدود حداکثر ۰/۷ متر به تراز آب اضافه می‌شود. در جریان‌های کِشندی، شارش جریان به سمت ساحل و به سمت بالای رودخانه را سیلان (Flood current) و خلاف آن را فروکش کردن (Ebb current) می‌گویند.
 باد غالب در منطقه مورد بررسی، از جهت غرب - شمال غربی و شمال - شمال غربی می‌وزد. این باد که نام محلی آن شمال است، نزدیک به نیمی از بادهای منطقه را



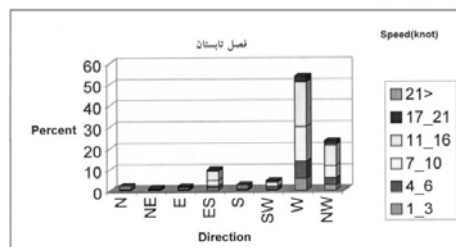
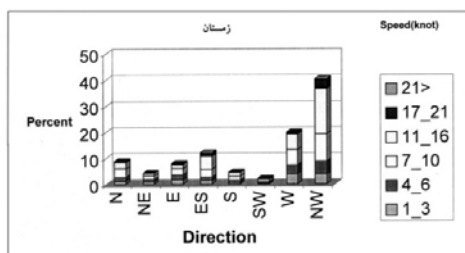
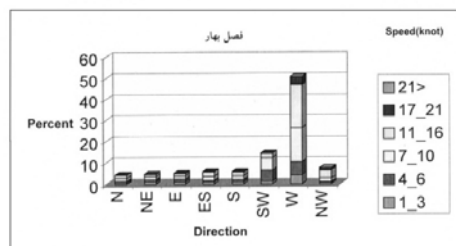
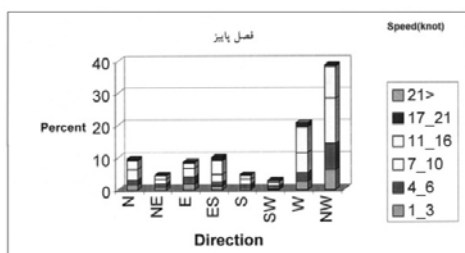
شکل ۱. موقعیت خلیج بوشهر در خلیج فارس (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۵).



شکل ۲. موقعیت بندر بوشهر، جزیره شیف و وضعیت قرارگیری کانال‌های دسترسی به این بندر (Google Earth).



شکل ۳. تغییرات ماهیانه ارتفاع کشتی در بوشهر (شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۷۹).



شکل ۵. نمودارهای ستونی باد بوشهر در فصل‌های پاییز و زمستان (مرکز تحقیقات کاربردی هواشناسی بوشهر، ۱۳۸۸).

شکل ۴. نمودارهای ستونی باد بوشهر در فصل‌های بهار و تابستان (مرکز تحقیقات کاربردی هواشناسی بوشهر، ۱۳۸۸).

عهده دارد (لویتین و همکاران، ۱۹۹۹).

در این تحقیق نحوه پخش آلودگی در خلیج بوشهر با استفاده از مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی کوهرنس در ۵ لایه مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل برای مدل‌سازی جریان‌های دریایی، معادلات ناویر-استوکس را مورد استفاده قرار می‌دهد و براساس تغییرات چگالی، شوری و تبادل باروکلینیکی بین گرادیان فشار و گرادیان چگالی سامانه، الگوی پخش را از سطح تا بستر محاسبه و شبیه‌سازی و نحوه پخش آلودگی را در خلیج بوشهر و در لایه‌های متفاوت با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی می‌کند.

معادله حاکم بر پخش آلاینده به شکل زیر است:

$$D \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} \right) + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + D \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + D \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

در این معادله، c غلظت آلاینده معلق (suspended contaminant concentration)، λ_H ضریب پخش افقی، λ_z ضریب پخش قائم، w, v, u سرعت‌های جریان

۳-۲ توصیف مدل

کوهرنس یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی چندمنظوره است، که برای آب‌های کرانه‌ای دریاها و فلات قاره‌ها از آن استفاده می‌شود. این مدل علاوه بر مدل‌های هیدرودینامیکی، شامل مدل‌سازی زیستی، مدل بررسی مسیر ذرات معلق، آلودگی‌ها و مواد محلول در آب نیز هست که از نتایج آن می‌توان فرایندهای مقیاس‌سازی فصلی را نام برد. این مدل، برای دریاها کم‌عمق و مناطق ساحلی نوشته شده است و قابل تغییر برای نقاط متفاوت عمیق و فراساحل نیز هست. این مدل دارای چهار مولفه یا بخش اصلی (major components) است:

- ۱- بخش فیزیکی که مدلی عمومی برای حل معادلات فرارفتی و پخش است.
- ۲- بخش چگونگی رسوب‌گذاری در مختصات اوپلری.
- ۳- بخش بررسی توزیع و انتقال آلودگی، در مختصات اوپلری و یا لاگرانژی.
- ۴- بخش زیستی، که بررسی تحرک میکروپلانکتون‌ها، ذرات و محلول‌های غیرآلی مانند نیتروژن و اکسیژن را به

(Finite difference)، گسسته می‌شوند (لویتین و همکاران، ۱۹۹۹).

$$\sigma = \frac{x_2 + h}{\xi + h} \quad (6)$$

در اینجا x_2 مؤلفه قائم بردار مکان در هر نقطه دلخواه است به طوری که سطح $x_2 = 0$ مطابق با تراز متوسط آب دریا است. همچنین ξ انحراف از تراز مندی ایستا (Departure from static equilibrium) و h ارتفاع واقعی آب است. همچنین در این تحقیق از تقریب صفحه f (f-plane approximation) استفاده شده است.

به منظور تهیه عمق‌سنجی (Bathymetry) و موقعیت خطوط ساحلی، چارت دریایی (Admiralty Charts) خلیج بوشهر با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (که از سوی سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح در ۱۳۷۵ استخراج شده است) با فاصله شبکه‌ای ۲۵۰ متر با نرم‌افزارهای Excel و Surfer رقمی شد (شکل ۶).

پارامترهای جوئی استفاده شده در این مدل، شامل مؤلفه‌های سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر و بارش، مربوط به ایستگاه هواشناسی دریایی بوشهر، در یک دوره آماری چهارساله (۱۳۸۴-۱۳۸۸) است.

دما و شوری مرز باز مدل را، با توجه به داده‌های شبیه‌سازی دما و شوری مدل کوهیرنس در خلیج فارس انتخاب کردیم که با مشاهدات ماهیانه هیدروگرافی السی، هانت و بوور در ۱۹۹۹ مطابقت دارد (السی و همکاران، ۱۹۹۹). همچنین، دامنه و فاز چهار مؤلفه اصلی کِشند (M_2 ، S_2 ، O_1 و K_1)، مربوط به بندر بوشهر، در مرزهای باز مدل در نظر گرفته شد.

براین اساس خلیج بوشهر، در راستای افق با قدرت تفکیک پذیری شرقی-غربی و شمالی-جنوبی؛ ۲۵۰ متر شبکه‌بندی، در راستای قائم، از بستر تا سطح به ۵ لایه، تقسیم‌بندی شد؛ به طوری که $\sigma = 0$ معرف تراز بستر (تراز اول) و $\sigma = 1$ معرف تراز سطح (تراز

در راستاهای x, y, z ، D عمق و Q جمله‌های چشمه و چاه آلاینده هستند (آلن، ۱۹۸۲).

λ_H ضریب پخش افقی متناسب با فاصله‌بندی شبکه افقی (Δ_x و Δ_y) و اندازه تانسور تبدیل سرعت (D_T)، طبق فرمول زیر، محاسبه می‌شود (اسماگورینسکی، ۱۹۶۳).

$$\lambda_H = C_{SO} \Delta_x \Delta_y D_T \quad (2)$$

در فرمول فوق، C_{SO} ضریب عددی است که در برنامه 0.1 انتخاب شده است (اوی و چن، ۱۹۹۲).

$$D_T^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (3)$$

λ_T ضریب پخش قائم، نیز مطابق رابطه زیر در برنامه محاسبه می‌شود:

$$\lambda_T = \frac{S_b k^2}{\varepsilon} + \lambda_b \quad (4)$$

که در آن، S_b تابع پایداری است و طبق فرمول (۵)، محاسبه می‌شود. k و ε به ترتیب انرژی جنبشی تلاطمی (Turbulent kinetic energy) و نرخ اتلاف انرژی تلاطمی (Dissipation rate of turbulence energy) هستند. همچنین ضریب پس‌زمینه (Background coefficient) λ_b ، برابر $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ در مدل قرار داده شده است.

$$\alpha_N = \frac{k^2}{\varepsilon^2} N^2 \quad ; \quad S_b = \frac{0.177}{1 + 0.403 \alpha_N} \quad (5)$$

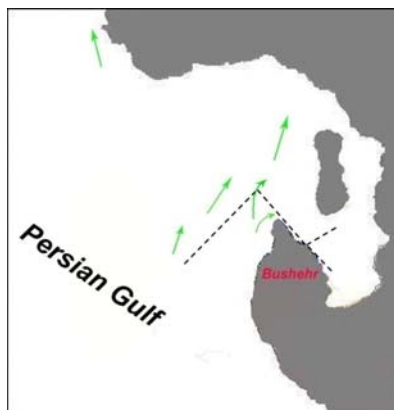
در فرمول فوق، N بسامد شناوری است (گالپرین و همکاران، ۱۹۸۸؛ لویتین و همکاران، ۱۹۹۶).

۲-۳-۱ آغازگری مدل

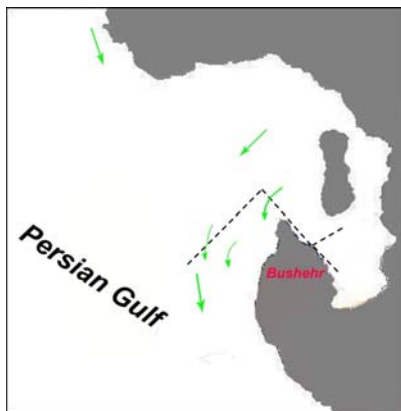
این مدل برای گسسته‌سازی معادلات در راستای افقی، از شبکه آراکاوا-C ("C" Arakawa) و در راستای قائم، از آرایه قائم سیگما (رابطه ۶) استفاده می‌کند که در آن معادلات به روش تفاضل متناهی

در تعیین مسیر حرکت شناورها (Float)، به هنگام فراکشند و فروکشند (Low tide)؛ به منظور شناخت بهتر جریان‌های سیلان و فروکش، به انجام رسانده که در ادامه، الگوی مسیر حرکت این شناورها با شکل‌های حاصل از مدل، شامل الگوهای جریان‌های سیلان و فروکش، و نیز الگوهای پخش آلودگی در طی جریان‌های سیلان و فروکش، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

در نهایت با حصول اطمینان از تطابق خوب مدل با واقعیت، الگوهای پخش آلودگی را با در نظر گرفتن ۳ چشمه آلودگی در نقاط متفاوت خلیج بوشهر در مدت زمان ۷ روز و ۱۴ روز پس از شروع آلودگی، پیش‌بینی کرده‌ایم. نتایج ردگیری شناورها در زمان‌های فراکشند و فروکشند در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است.



شکل ۷. مسیر حرکت شناورها (→) در زمان فراکشند (شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۷۹).

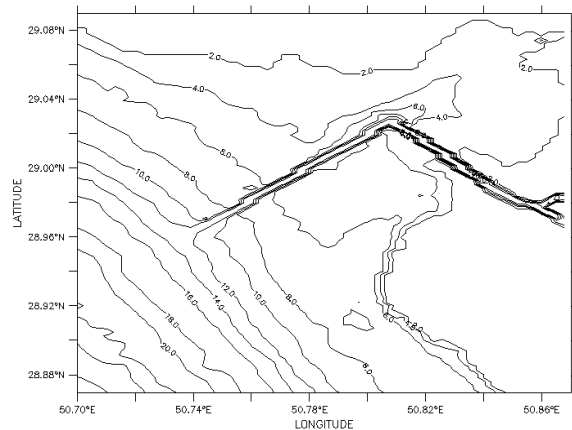


شکل ۸. مسیر حرکت شناورها (→) در زمان فروکشند (شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۷۹).

پنجم) است. ترازهای میانی نیز با حرکت از بستر به سمت سطح، مقادیر σ بین صفر تا یک را اختیار می‌کنند.

در این مدل نیروهای کشند، باد، اصطکاک و تغییرات چگالی به طور هم‌زمان به مدل اعمال شده‌اند. گام زمانی مورد استفاده برابر ۶ ثانیه و گام مکانی آن ۲۵۰ متر است. همچنین غلظت ماده آلاینده بر حسب g/m^3 است.

برای رسیدن به مرحله پایداری، مدل پیش‌گفته را برای ۵ سال اجرا کردیم. طی این فرایند، رژیم گردش آب به همراه دیگر خواص توده آب در خلیج بوشهر در مدت مورد نظر به یک چرخه پایدار (Steady state) رسید.



شکل ۶. عمق‌سنجی خلیج بوشهر به کار گرفته شده در مدل در محیط نرم‌افزاری فریت (Ferret).

۳ محدودیت‌ها و ملزومات تحقیق

در این تحقیق، نحوه پخش آلودگی خلیج بوشهر در یک مدل ۵ لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی پایداری مدل، این مدل را برای ۵ سال در منطقه خلیج بوشهر اجرا کردیم تا طی آن، رژیم گردش آب به همراه دیگر خواص توده آب در خلیج بوشهر در مدت مورد نظر به یک چرخه پایداری (Steady state) رسید.

برای صحت‌سنجی مدل طراحی شده برای خلیج بوشهر، از الگوها و دیده‌بانی‌های جریان تهیه شده از سوی شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی استفاده شد. شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، در تابستان ۷۹ علاوه بر اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای جریان، بررسی‌های دیگری را نیز

دوره تناوب کِشندی، نشان می‌دهد که به دلخواه، از بین مدت زمان بررسی کِشند و جریان در موقعیت جغرافیایی (50°46'11" E و 28°53'42" N)، استخراج شده است.

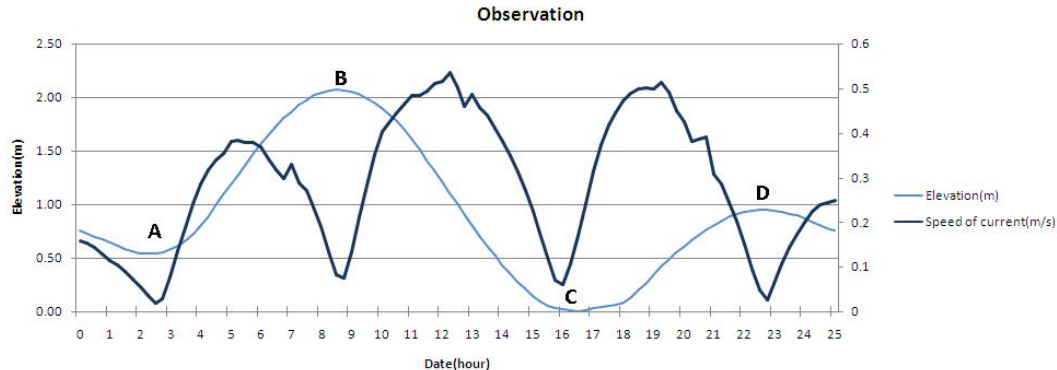
در نقاط بیشینه و کمینه ارتفاع سطح آب (A، B، C و D)، اندازه جریان کمینه است (وضعیت آب ساکن (Slack Water)). در بازه زمانی بین نقاط A و B و با افزایش ارتفاع سطح آب، الگوی میانگین جریان سیلان در سطح، مطابق شکل ۱۱ است.

مقایسه شکل‌های ۱۱ با ۷، نشان می‌دهد که جهت حرکت شناورها با جهت جریان در محدوده‌های موردنظر کاملاً هم‌خوانی دارد. به بیان دیگر، جریان سیلان و پیرو آن شناورها، در محدوده کانال بیرونی، از سمت جنوب و جنوب غرب به سمت شمال و شمال شرق حرکت می‌کنند، به نحوی که بخشی از آنها وارد خور سلطانی می‌شوند و قسمت دیگر به سواحل شمالی خلیج بوشهر می‌رسند.

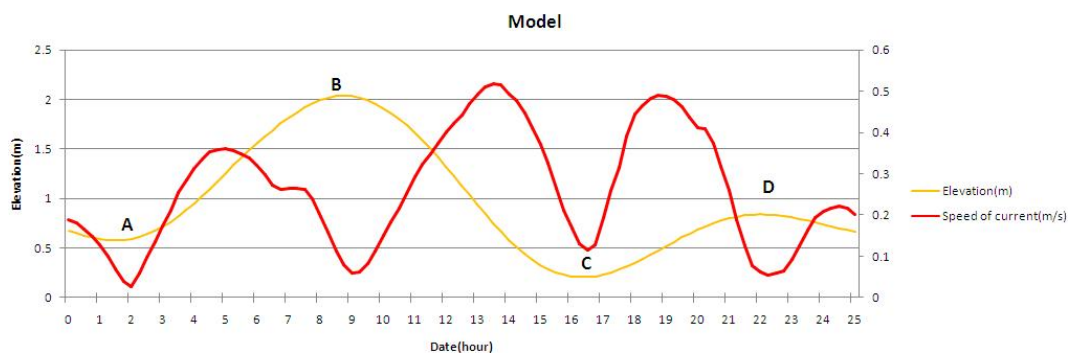
بنا بر شکل ۷، جریان‌های در زمان فراکِشند، در محدوده کانال بیرونی، از سمت جنوب و جنوب غرب به سمت شمال و شمال شرق حرکت می‌کنند به نحوی که بخشی از آنها وارد خور سلطانی می‌شوند و قسمت دیگر به سواحل شمالی خلیج بوشهر می‌رسند. در نتایج حاصل از ردگیری شناورها در زمان فروکِشند (شکل ۸)، جریان‌های از سمت سواحل جزیره شیف به کانال‌ها نزدیک می‌شوند و در جهت تقریباً موازی با کانال بیرونی، از پیچ کانال و کانال داخلی عبور می‌کنند. سپس در کانال بیرونی قسمتی از جریان‌های به سمت غرب خلیج بوشهر حرکت می‌کنند و قسمت دیگر به موازات بندر بوشهر، جنوب‌سوی می‌شوند.

۴ یافته‌ها

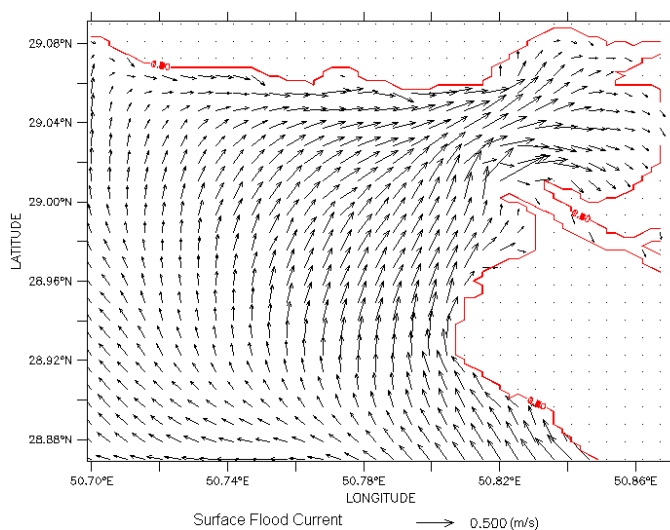
شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب نوسان سطح آب و اندازه جریان به دست آمده از اندازه‌گیری و مدل را طی یک



شکل ۹. نوسان سطح آب و اندازه جریان حاصل از دیده بانی در یک دوره تناوب کِشندی (شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۷۹).



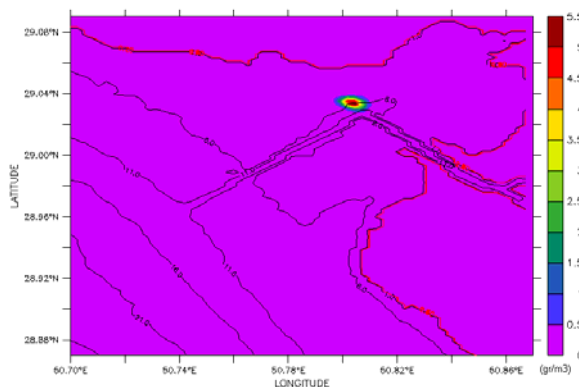
شکل ۱۰. نوسان سطح آب و اندازه جریان حاصل از مدل در یک دوره تناوب کِشندی.



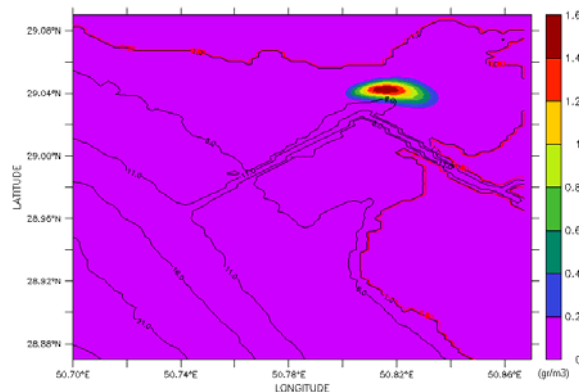
شکل ۱۱. الگوی میانگین جریان سیلان سطحی در خلیج بوشهر.

لحظه شروع آلودگی را در لحظه A، در لایه سطحی نشان می‌دهد و شکل ۱۳ پخش آلودگی را در پایان جریان سیلان (زمان B)، در سطح را نشان می‌دهد.

یک چشمه پخش آلودگی را در پیچ کانال، در نظر می‌گیریم. فرض بر آن است که لحظه شروع پخش آلودگی، هم‌زمان با شروع جریان سیلان یعنی زمان A در شکل‌های ۹ و ۱۰ باشد. شکل ۱۲،



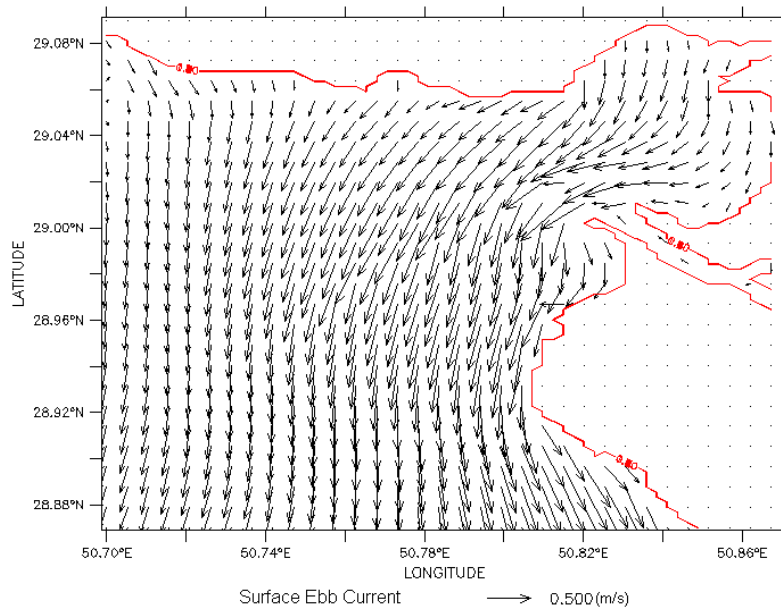
شکل ۱۲. پخش آلودگی در لحظه شروع جریان سیلان (زمان A) در لایه سطحی (نقطه A) در لایه سطحی.



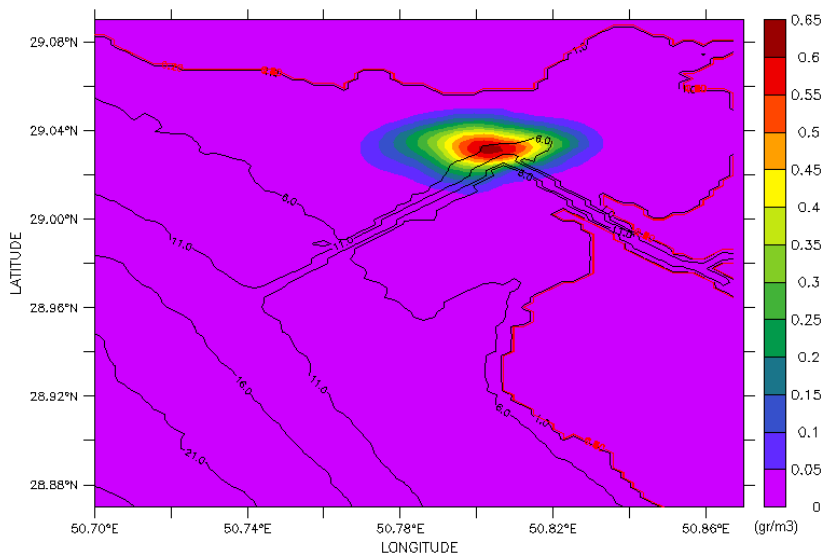
شکل ۱۳. پخش آلودگی در لحظه پایان جریان سیلان (شروع جریان فروکش در زمان B) در لایه سطحی.

از آن است که جریان فروکش در محدوده کانال‌ها، برعکس جریان سیلان، از سمت شمال و شمال‌شرق به سمت جنوب و جنوب‌غرب حرکت می‌کند. شکل ۱۵، پخش آلودگی را در زمان C نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ متوجه می‌شویم که در بازه زمانی بین B و C، (زمان فروکشند)، الگوی پخش آلودگی با جهت جریان فروکش کاملاً مطابقت دارد.

بررسی نتایج مدل مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نشان می‌دهد آلودگی در بازه زمانی A تا B، تحت تأثیر جریان سیلان، پخش می‌شود. شکل ۱۴، الگوی میانگین جریان فروکش را در سطح، در مدت زمان بین لحظه‌های B و C (هنگام فروکشند)، نشان می‌دهد. تطابق بین مسیر حرکت شناورها در زمان فروکشند شکل ۸، با الگوی جریان فروکش سطحی شکل ۱۴، در محدوده کانال‌های دسترسی به بندر بوشهر حاکی



شکل ۱۴. الگوی میانگین جریان فروکش سطحی در خلیج بوشهر.



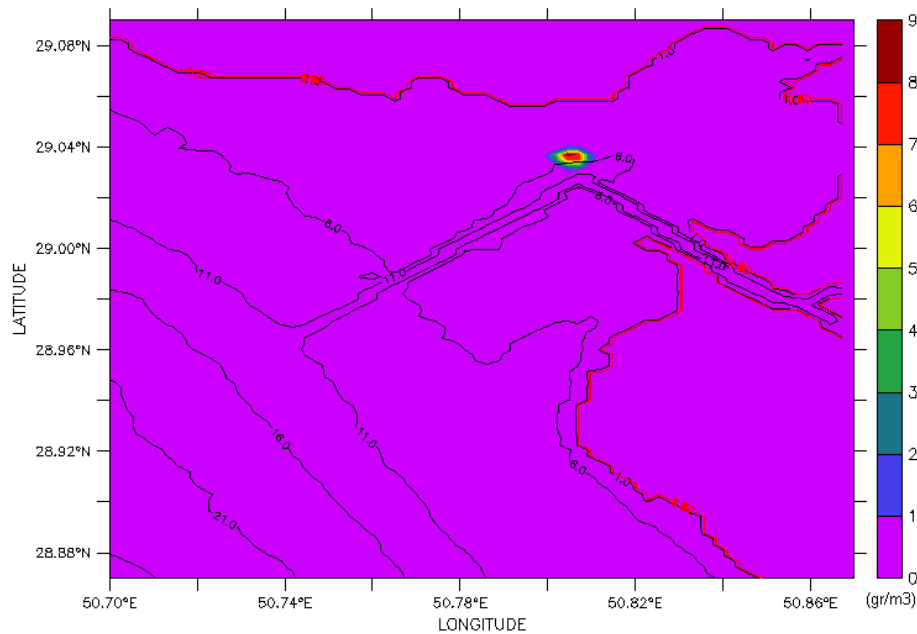
شکل ۱۵. پخش آلودگی در لحظه پایان جریان فروکش (زمان C) در لایه سطحی.

داده شده است.

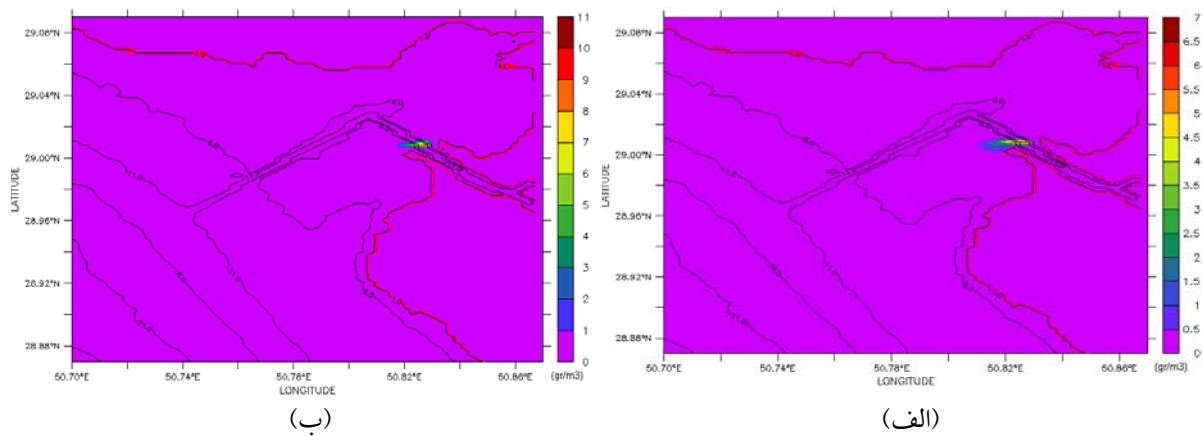
لحظه شروع آلودگی، برای چشمه آلودگی در پیچ کانال، در لایه سطحی، در شکل ۱۲، نمایش داده شد. شکل ۱۶، چشمه آلودگی در موقعیت پیچ کانال را در لایه بستر، به هنگام شروع آلودگی نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۷ الف و ب، ۱۸ الف و ب موقعیت دو چشمه آلودگی دیگر را به هنگام شروع آلودگی، در سطح و بستر نشان می‌دهند.

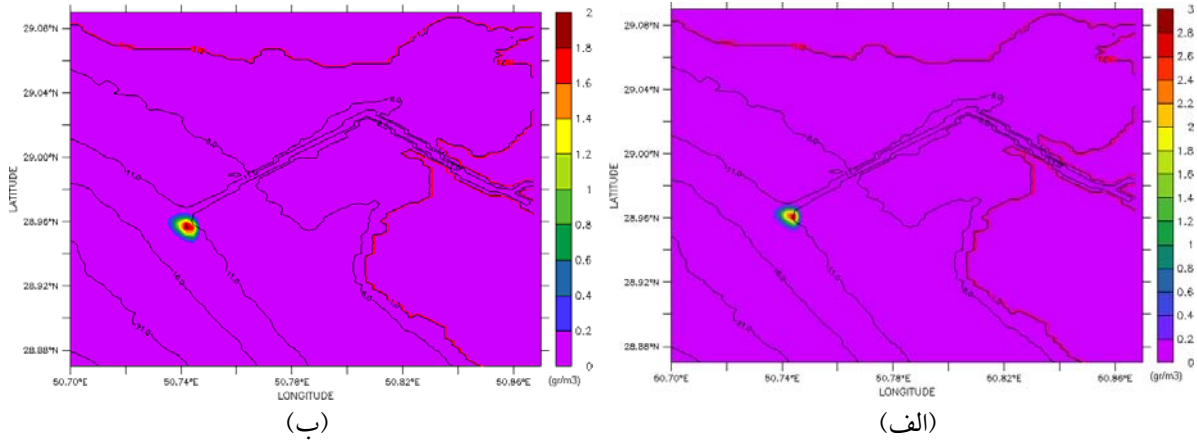
پس از ارزیابی تطابق نتایج میدان جریان حاصل از مدل، با دیده‌بانی و میدان جریان سطحی حاصل از حرکت شناورها؛ به منظور شناخت چگونگی الگوی پخش آلودگی، علاوه بر یک چشمه آلودگی که پیش‌تر معرفی شد؛ دو چشمه آلودگی دیگر، در دهانه ورودی خور سلطانی و انتهای کانال بیرونی، در نظر گرفتیم و الگوی پخش هریک از ۳ آلودگی را طی مدت ۱۴ روز مورد بررسی قرار دادیم. حالت‌های مربوط به پخش هر آلودگی با فاصله زمانی هر ۷ روز در شکل‌های ۱۶ تا ۲۴، نمایش



شکل ۱۶. لحظه شروع آلودگی در موقعیت پیچ کانال در لایه بستر.



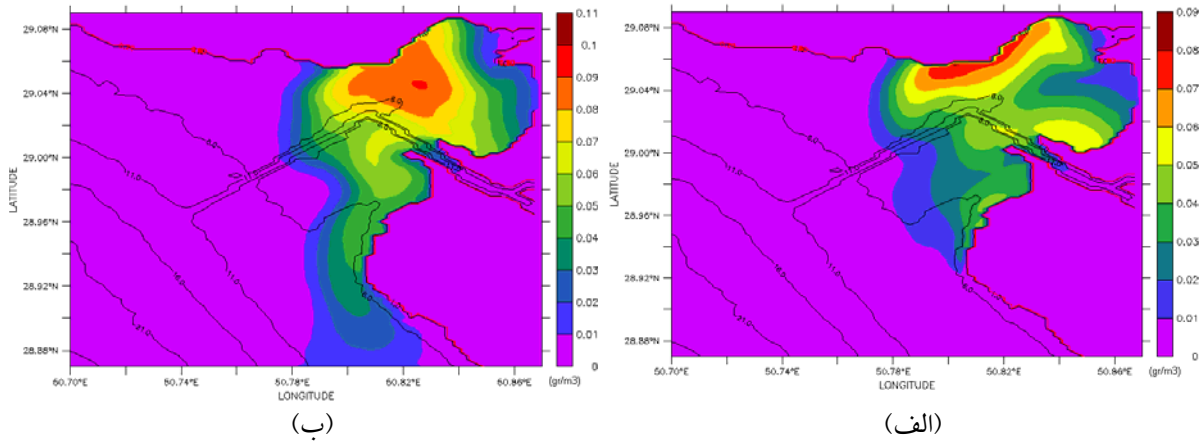
شکل ۱۷. الف) لحظه شروع آلودگی در دهانه ورودی خور سلطانی در لایه سطحی، ب) لحظه شروع آلودگی در دهانه ورودی خور سلطانی در لایه بستر.



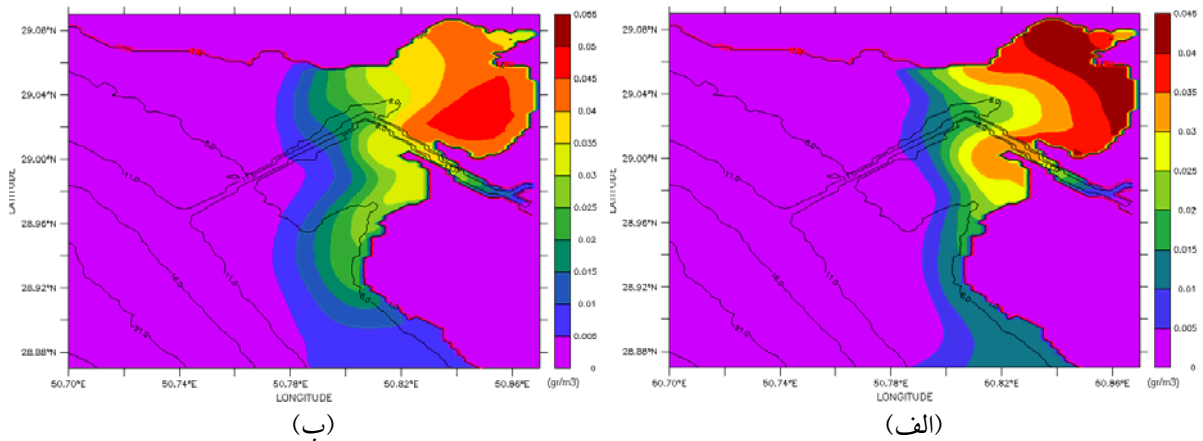
شکل ۱۸. الف) لحظه شروع آلودگی در انتهای کانال بیرونی در لایه سطح، ب) لحظه شروع آلودگی در انتهای کانال بیرونی در لایه بستر.

را در سطح و بستر نشان می‌دهند.

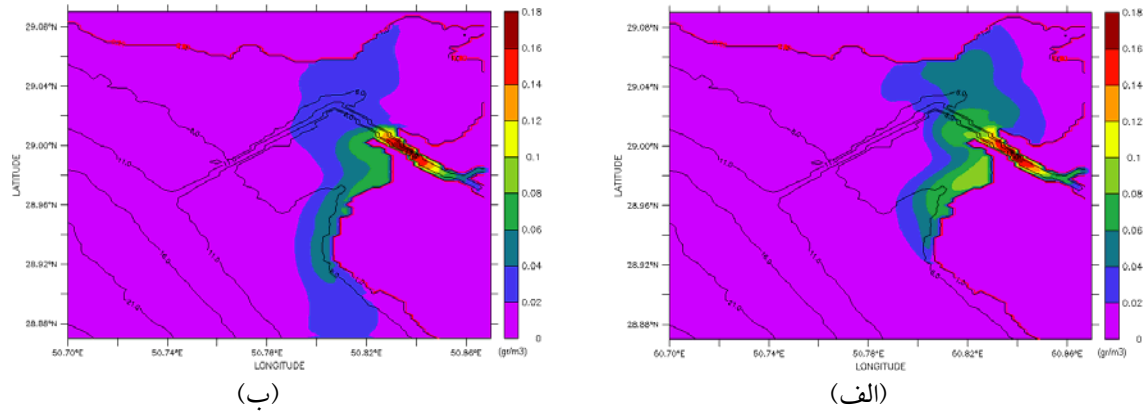
شکل‌های ۱۹-الف و ب تا ۲۴-الف و ب، به ترتیب ۷ روز و ۱۴ روز پس از آغاز پخش هریک از سه آلودگی



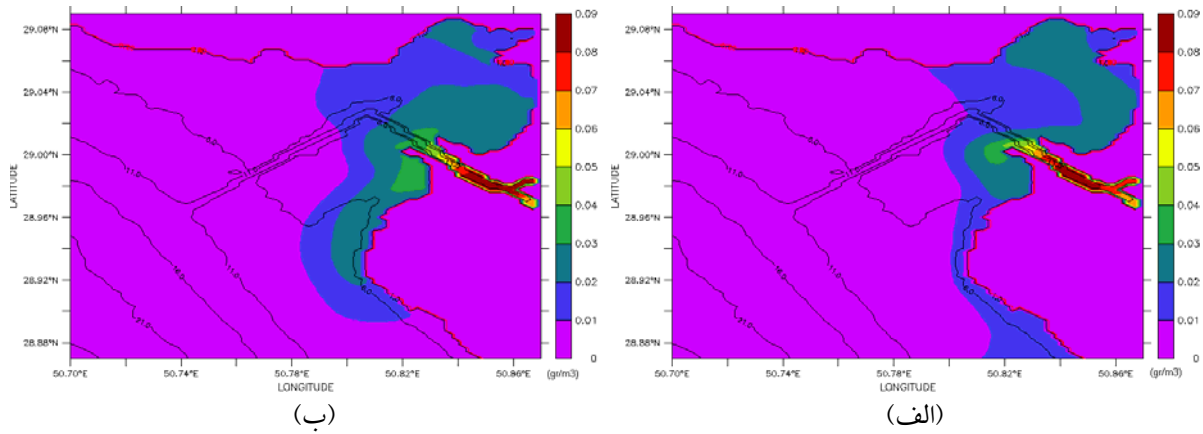
شکل ۱۹. الف) ۷ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت پیچ کانال در لایه سطح، ب) ۷ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت پیچ کانال، در لایه بستر.



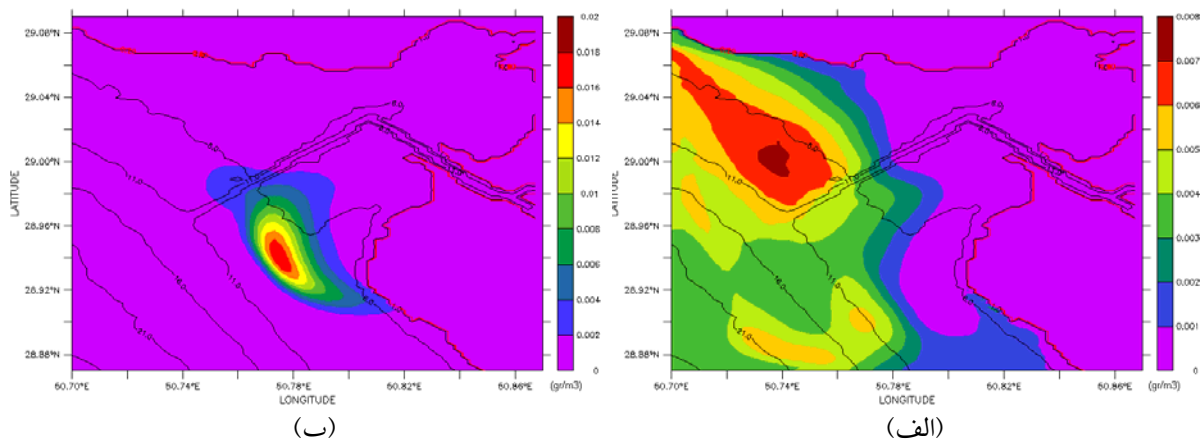
شکل ۲۰. الف) ۱۴ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت پیچ کانال در لایه سطح، ب) ۱۴ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت پیچ کانال، در لایه بستر.



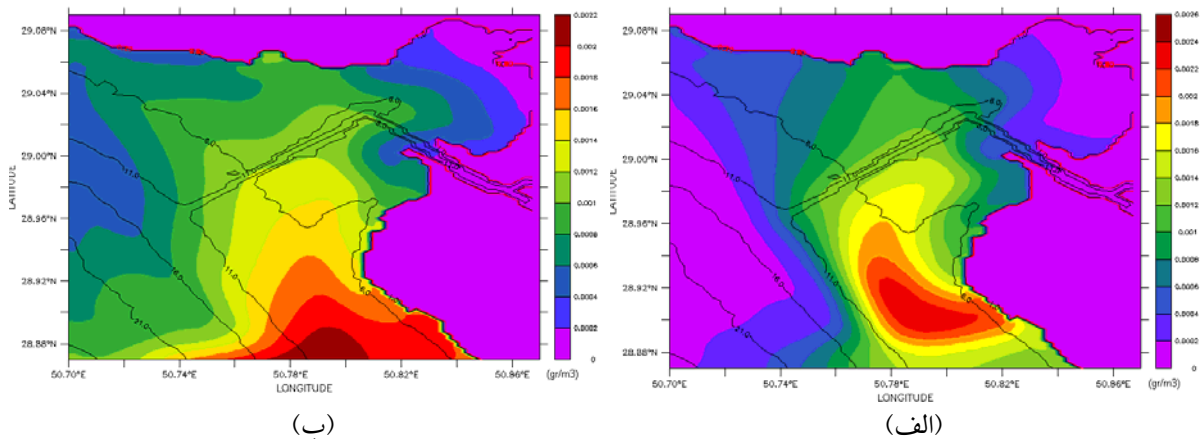
شکل ۲۱. الف) ۷ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت دهانه خور سلطانی در لایه سطح، ب) ۷ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت دهانه خور سلطانی، در لایه بستر.



شکل ۲۲. الف) ۱۴ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت دهانه خور سلطانی در لایه سطح، ب) ۱۴ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت دهانه خور سلطانی در لایه بستر.



شکل ۲۳. الف) ۷ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت انتهای کانال بیرونی در لایه سطح، ب) ۷ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت انتهای کانال بیرونی در لایه بستر.



شکل ۲۴. الف) ۱۴ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت انتهای کانال بیرونی در لایه سطح، ب) ۱۴ روز پس از شروع پخش آلودگی در موقعیت انتهای کانال بیرونی در لایه بستر.

۵ نتیجه گیری

۴- در خلیج بوشهر کوتاه بودن طول بادگیر سبب می‌شود جریان‌های باد رانده قوت چندانی نداشته باشند؛ از این رو عمده جریان‌های منطقه، جریان‌های کِشندی هستند. این مهم در اندازه‌گیری‌ها و حرکت شناورهای سطحی نیز به چشم می‌خورد. با توجه به این شرایط، از داده‌های میانگین روزانه باد استفاده کرده‌ایم ولی مدل را برای دریافت خروجی‌های ساعت‌به‌ساعت تنظیم کردیم. این محدودیت موجب می‌شود تا مدل به جریان‌های کِشندی بیشتر از جریان‌های ناشی از باد حساسیت نشان دهد و از آنجا که مهم‌ترین عامل پخش آلودگی، جریان است؛ آلودگی در خلیج بوشهر، تحت تأثیر جریان‌های عمدتاً کِشندی این خلیج پخش می‌شود.

۵- از آنجا که در منطقه مورد بررسی، جریان فروکش قوی‌تر از جریان سیلان است؛ آلودگی بیشتر در جهت جریان فروکش پخش می‌شود این امر در مورد هر سه چشمه آلودگی، در سطح و بستر، صادق است.

۶- منابع آلودگی در پیچ کانال و دهانه خور سلطانی، در مدت ۱۴ روز، عمدتاً در ساحل غربی محدوده مورد بررسی پخش می‌شوند در حالی که چشمه آلودگی در انتهای کانال خارجی، در همین بازه زمانی تقریباً در کل محدوده پخش می‌شود. علت این امر آن است که اولاً

بررسی شکل‌های گوناگون حاصل از مدل‌سازی جریان‌های، روشن ساخت که الگوی جریان‌های خلیج بوشهر، غالباً تحت تأثیر کِشند رخ می‌دهند. اندازه‌گیری و ردگیری شناورها نیز چنین نتیجه‌ای را نشان می‌دهد. الگوی جریان‌ها، برای کل خلیج بوشهر در زمان‌های فراکِشند و فروکِشند، و الگوی پخش آلودگی با معرفی سه منبع آلودگی در سه نقطه مجزا به مدت ۱۴ روز، مورد تحقیق قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- جریان‌های سیلان و فروکش در خلیج بوشهر، به ترتیب شمال‌سوی و جنوب‌سوی هستند (شکل‌های ۱۱ و ۱۴).

۲- بنابر اندازه‌گیری مربوط به جریان و نوسان سطح آب (شکل ۹)، کمینه بودن اندازه جریان در زمان‌های بیشینه و کمینه ارتفاع سطح آب، مشهود است. چون در این مواقع، وضعیت آب ساکن رخ داده و جریان در حال تغییر از حالت سیلان به فروکش و یا برعکس است. این موضوع در نتایج مناظر حاصل از مدل (شکل ۱۰)، نیز به چشم می‌رسد.

۳- در منطقه مورد بررسی، جریان فروکش بزرگ‌تر از جریان سیلان است. علت این امر شیب ساحل است که به سمت دریا و در جهت موافق با جریان فروکش قرار دارد.

منابع

آمار دیده بانی پارامترهای هواشناسی ایستگاه های هواشناسی بوشهر، ۱۳۸۸، مرکز تحقیقات کاربردی هواشناسی بوشهر.

گزارش اندازه گیری های دریایی و رسوب در بندر بوشهر، ۱۳۷۹، شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی.

محمودی، س. م.، ۱۳۸۶، مدل سازی آلودگی در خلیج فارس با مدل کوهیرنس، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.

Allen, C. M., 1982, Numerical simulation of contaminant dispersion in estuary flows, Proceedings of the Royal Society of London, A381, 179-194.

Alessi, C. A., Hunt, H. D. and Bower, A. S., 1999, Hydrographic data from the U.S. Naval Oceanographic Office, Persian Gulf, Southern Red Sea, and Arabian Sea 1923-1996, Woods Hole. 5. Oceanog. Inst. Tech. Rep., WHOI-99-02.

Bingchen, L., Huajun, L. and Aiqun, W., 2008, Application of COHERENS-SED in modeling contaminant transport of Yangpu Bay, Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, August 24-30, Darmstadt, 159-163.

Clark, A. V., 1982, Persian Gulf Pilot: The Persian Gulf and Its Approaches, from Ra's Al Junayz, in the South-west, to Gwatār Bay in the East, Issue 7, Admiralty charts and publications, Hydrographic Dept, Hydrographer of the Navy, 262pp.

Dimitar, M., Alain, N. and Jos'e Manuel, Z., 2006, Application of COHERENS model for hydrodynamic investigation of Sacca di Goro coastal lagoon (Italian Adriatic Sea shore), Ecological Modelling, 193, 52-68.

Fay, J. A., 1971, Physical processes in the Spread of Oil on a Water Surface. Proceedings of Joint Conference on prevention and Control of Oil Spills, A merican Petroleum Institute, 463-467.

Galperin, B., Kantha, L. H., Hassid, S. and Rosati, A., 1988, A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. Journal of the Atmospheric Sciences, 45, 55-62.

Luyten, P. J., Deleersnijder, E., Ozer, J. and Ruddick, K. G., 1996, Presentation of a family of turbulence closure models for stratified

چشمه های آلودگی در پیچ کانال و خور سلطانی با سواحل محدود می شوند. ثانیاً جهت جریان فروکش (که قوی تر از سیلان است) در دو موقعیت پیش گفته به سمت سواحل غربی است.

۷- یکسان بودن غلظت و الگوی پخش آلودگی در سطح و بستر برای نواحی داخل خورها و ساحل جزیره شیف، برای چشمه های آلودگی در پیچ کانال و دهانه خور سلطانی (در هر دو گام زمانی ۷ روز و ۱۴ روز) بیانگر زمان ماندگاری (Flushing time) طولانی تر آلودگی در این نواحی نسبت به دیگر بخش های خلیج بوشهر است. لازم به ذکر است که الگوهای پخش آلودگی سطح و بستر برای موقعیت کانال خارجی، به ویژه در بخش های میانی و جنوبی، باهم متفاوت اند که این نشان دهنده پخش سریع تر (زمان ماندگاری کمتر) آلودگی در این نواحی است. الگوهای جریان سیلان و فروکش، در سطح و بستر، نیز تندی جریان کمتری را در داخل خورها و ساحل جزیره شیف، نسبت به دیگر بخش های منطقه مورد بررسی نشان می دهند.

در این تحقیق نتایج پیش بینی جریان و پخش آلودگی، با مشاهدات حرکت شناورها مقایسه شده و دارای همخوانی است. بنابراین با استفاده از نتایج مدل، که دقت بسیار خوبی دارد، می توان از آن برای پیش بینی و ردگیری پخش آلودگی در محیط دریایی خلیج بوشهر استفاده کرد و در نتیجه آن بتوان با پیشنهاد دادن راهکار مناسب از هدر رفتن هزینه و وقت جلوگیری کرد. همچنین این تحقیق می تواند پایه ای برای بررسی ها و پژوهش های بعدی باشد.

تشکر و قدردانی

در پایان بر خود به لازم می دانیم تا از دقت نظر و راهنمایی های داوران محترم، که باعث غنی تر شدن بیشتر این مقاله شدند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

- shallow water flows and preliminary application to the Rhine outflow region, *Continental Shelf Research*, **16**, 101–130.
- Luyten, P. J., Jones, J. E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P. and Wild-Allen, K., 1999, COHERENS -A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation, MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 914 pp.
- Murray, S. P., Smith, W. G. and Sonu, C. J., 1970, Oceanographic observation and theoretical analysis of oil slicks during the Chevron spill, March 1970. Louisiana State Univ., Coastal Studies Inst., Tech. Report, 101pp.
- Murray, S. P., 1972, Turbulent Diffusion of Oil in the Ocean, *Limnology and Oceanography*, **17**(5), 651-660.
- Oey, L. Y. and Chen, P., 1992, A model simulation of circulation in the Northeast Atlantic shelves and seas, *Journal of Geophysical Research*, **97**(C12), 20, 087–20, 115.
- Reynolds, R. M., 1993, Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman, Results from the Mt Mitchell expedition, Brookhaven National Lab. Upton NY 11973 ETATS-UNIS, Marine pollution bulletin, **27**, 35-59.
- Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equations – I, The basic experiment, *Monthly Weather Review*, **91**, 99–165.
- UNEP. 2002, Global Environment Outlook 3 – past, present and future perspectives. London, Earthscan. Available at: www.unep.org/geo.