



تعیین نوع پلوم رودخانه ارونده با مدل‌سازی عددی

عباس عینعلی^{۱*}، مسعود صدری‌نسب^۲، محمد اکبری‌نسب^۳

۱-استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده‌ی علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر

۲-دانشیار، دانشکده‌ی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

۳-دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده‌ی علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

چکیده

پلوم رودخانه به سه نوع سطحی، عمقی و میانی در طبیعت تشکیل می‌شود. این تقسیم‌بندی تأثیر کاملاً آشکاری بر ویژگی‌های زیستی و غیرزیستی آب دهانه رودخانه دارد. با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، نوع پلوم رودخانه ارونده آشکار شد. پلوم این رودخانه بر ویژگی‌های آب شمال‌غرب خلیج فارس تأثیرگذار است. به این منظور، مدل FVCOM برای مدل‌سازی دما، شوری و چرخش آب خلیج فارس بکار گرفته شد. در این مدل از شبکه‌ی افقی المان مثلثی با قدرت تفکیک مکانی متغیر و شبکه‌ی قائم با ۲۰ لایه سیگما استفاده شد. دما و شوری در مرز باز از خروجی‌های مدل HYCOM که با داده‌های اندازه‌گیری و ماهواره مقایسه و مطابقت گردیده، استفاده شد. همچنین در مرز باز چهار مؤلفه اصلی جزر و مدی به مدل اعمال شد. پس از پایداری مدل، لایه‌بندی ستون آب و شکل و گستردگی پلوم دهانه رودخانه بررسی شد. بهجهت مطالعه تأثیر باد بر ساختار پلوم، چندین حالت مختلف باد منطقه، به مدل اعمال شد. در شرایط بدون باد، پلوم رودخانه به‌دلیل چرخش آب شمال‌غرب خلیج فارس و تحت تأثیر نیروی کوریولیس به سمت جنوبی متمایل می‌شود. شکل و گستردگی پلوم با شرایط باد تغییر می‌کند؛ بهنحوی که تفاوت مساحت پلوم در دو حالت باد 4 متربرمترانیه شمالی و جنوبی 300 کیلومترمربع است. با توجه به لایه‌بندی آشکار ستون آب دهانه رودخانه و تأثیرپذیری شدید پلوم از شرایط باد، پلوم رودخانه ارونده از نوع سطحی است. این موضوع از منظر شیلاتی، زیست‌محیطی و آلودگی بسیار حائز اهمیت است.

کلمات کلیدی: پلوم سطحی، لایه‌بندی، خلیج فارس، FVCOM، استان خوزستان.

۱- مقدمه

دهانه‌ی رودخانه و پلوم آن، منطقه‌ای است که برهم‌کنش چهار محیط دریا، خشکی، هوا و رودخانه است (Gonçalves et al., 2012). بنابراین دهانه رودخانه و محدوده‌ی پلوم آن، محیطی است که از همه‌ی این محدوده‌ها تأثیر می‌پذیرد (Kamidis et al., 2015). علاوه‌بر این پلوم رودخانه نیز بر هیدرودینامیک ساحل، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی، رسوبی، آلودگی و غیره تأثیرگذار است (Garvine, 1995). همه این واقعیت‌ها سبب شده تا محققان بسیاری به مطالعه جنبه‌های مختلف این محدوده بپردازنند.

در طبیعت پلوم رودخانه به سه حالت مشاهده می‌شود. در حالت اول که به آن پلوم عمقی^۱ گفته می‌شود، آب ورودی رودخانه به محیط دریا، از سطح تا بستر از آب دریا مجزا است. به عبارتی مرز پلوم در این حالت از سطح تا بستر است. در حالت دوم، که به آن پلوم سطحی^۲ گفته می‌شود، آب ورودی رودخانه به صورت لایه‌ای باریک روی آب دریا مستقرشده و آب دریا (با چگالی بیشتر) به زیر آن نفوذ می‌کند. در این حالت، پلوم در محدوده‌ی وسیعی امتداد یافته و از ساحل دور می‌شود. پلوم سطحی به جز در نزدیکی دهانه رودخانه، ارتباطی با بستر دریا ندارد. پلوم رودخانه نیاگارا که تا پانزده کیلومتر از دهانه، فاصله می‌گیرد نمونه‌ای از پلوم سطحی است. حالت سوم که به آن پلوم میانی گفته می‌شود - حالتی بین پلوم سطحی و عمقی - حالتی است که آب کم‌چگال رودخانه تا فاصله‌ای از دهانه رودخانه با بستر دریا در تماس بوده و پس از آن از بستر فاصله گرفته و در سطح به سمت دور از ساحل امتداد می‌یابد (Yankovsky & Chapman, 1997). پلوم سطحی بسیار نسبت به پلوم عمقی به شرایط باد و جزر و مد حساس‌تر است (Tarya et al., 2015). درواقع ابعاد پلوم تا حدود زیادی متأثر از دبی رودخانه و جهت‌گیری آن عمدتاً متأثر از شرایط باد است (Kamidis et al., 2015). بنابراین با وجود شباهت بین پلوم سطحی و عمقی (نظیر مرزبندی از آب دریا و تأثیرپذیری از میزان دبی رودخانه و نیروی کوریولیس)، تفاوت‌های زیادی بین این دو حالت از منظر هیدرودینامیک و ابعاد مکانی وجود دارد (& Chapman, 1997).

به‌طور کلی به سه دلیل عمده، مطالعه و بررسی پلوم رودخانه ضروری است: ۱- شکل، اندازه و جهت‌گیری پلوم تأثیر مستقیم بر ویژگی‌های زیستی، شیمیایی، فیزیکی، رسوبی، آلودگی و غیره دارد. ۲- محدوده پلوم رودخانه به‌علت گرادیان شدید پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی (دمای شوری، مواد غذی و ...)، رسوبات و غیره زیستگاه گونه‌های متعدد جانوری است و از نظر شیلاتی حائز اهمیت است ۳- ویژگی‌های آب به‌ویژه ویژگی‌های

زیستی و آلودگی در محدوده پلوم رودخانه، متأثر از حوضه‌ی آبریز بوده و نشان‌دهنده‌ی شرایط و وقایع بالادست رودخانه است (Yankovsky & Chapman, 1997).

(چاؤ و بیوکورت^۱، ۱۹۸۶: ۲۱۳۷) محققانی هستند که برای نخستین بار ساختار پلوم و جریانات موازی با ساحل مربوط به آن با شبیه‌سازی عددی بررسی کردند (Chao & Boicourt, 1986). (اکسینگ و دیوبس^۲، ۱۹۹۹: ۱۴۳۷) نشان دادند که تنفس برشی باد^۳ اختلاط عمودی را افزایش داده و بر پروفایل عمودی و افقی پلوم مؤثر است (Garvine, 1999). (گاروین^۴، ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲: ۳۰۱ و ۲۹۳) تأثیر نیروی کوریولیس (Garvine, 1981 و 1982) و (ویسمان و گاروین^۵: ۱۹۹۵: ۵۰۹) تأثیرپذیری پلوم از مورفولوژی ساحل را بررسی کردند (Wiseman & Garvine, 1995). در مطالعه (کامیدیس^۶ و همکاران، ۱۵: ۲۰۱۵) با استفاده از مدل‌های عددی اثر نیروهای خارجی بر شکل‌گیری، اندازه و ساختار پلوم رودخانه نستوس^۷ بررسی شد. بررسی تأثیر کشند بر رفتار پلوم رودخانه نستوس با دو بار اجرای مدل بررسی شد. در این دو اجرا هیچ بادی به مدل اعمال نشد. در اجرای اول فقط نیروی کوریولیس اعمال شد و در اجرای دوم کشند نیز در نقاط مرزی اعمال شد. در هر دو اجرا دبی رودخانه ۴۰ مترمکعب بر ثانیه انتخاب شد. سپس تغییرات شوری، نوسانات سطح و سرعت قائم محاسبه شد و مشخص شد که نتایج در هر دو اجرا مشابه هم بوده و بنابراین کشند اثر خاصی بر پلوم نداشت. نتایج همچنین نشان داد که رفتار پلوم نستوس به شدت متأثر از نیروهای اتمسفری است، در حالی که اندازه آن اساساً به‌واسطه میزان دبی آن رودخانه تعیین می‌شود. گستردگی پلوم از جهت باد تبعیت می‌کند. اهمیت سرعت باد از آنجاست که سبب دور کردن پلوم از دهانه رودخانه شده و در همین حال اختلاط با آبهای شور لایه‌های زیرین افزایش می‌یابد. با این حال تحت شرایط باد ضعیف یا بدون باد، نیروی کوریولیس غالب خواهد بود (Kamidis et al., 2014). (فالچیری^۸ و همکاران، ۱۳: ۲۰۱۳) با استفاده از مدل سازی عددی سه‌بعدی، پلوم رودخانه پو^۹ در دریای آدریاتیک^{۱۰} در شمال شرق دریای مدیترانه را بررسی کردند. این رودخانه به همراه چندین رودخانه کوچک‌تر نقش اساسی در فرایندهای فیزیکی، زیستی، شیمیایی و زمین‌شناسی منطقه دارد. در این تحقیق الگوی پلوم سطحی و تغییرات آن بر اثر نیروهای اصلی (باد و دبی رودخانه) بررسی شد. نتایج این تحقیق دو الگوی متضاد برای پلوم رودخانه را آشکار کرد. الگوی اول، پلوم کوچک و محدود به سواحل است که معمولاً با دبی کم رودخانه و/یا باد بورا^{۱۱} شکل می‌گیرد. الگوی دوم، پلومی وسیع‌تر است که معمولاً با دبی بیشینه

1-Chao & Boicourt

2-Xing & Davies, 1999

3-Wind shear stress

4-Garvine

5-Wiseman & Garvine

6-Kamidis

7-Nestos

8-Francesco Marcello Falcieri

9-Po River

10-Adriatic Sea

11-Bora Wind

رودخانه و/یا بادهای سیروکو^۱ شکل می‌گیرد. به طور کلی سایز پلوم و الگوی جریانات تحت تأثیر دبی رودخانه است، در حالی که با وزش چند روزه باد شکل پلوم تغییر می‌کند (Falcieri et al., 2014). (او سادچیف،^۲ ۲۰۱۵) ص ۹) پلوم رودخانه‌های امزمیتا^۳ و سوشی^۴ که در سواحل شرقی دریای سیاه قرار دارند را بررسی کرد. در این تحقیق با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌سازی عددی و سنجش‌از دور، ابعاد پلوم رودخانه بررسی و بر این اساس دبی رودخانه تخمین زده شد. در بخش مدل‌سازی تحقیق از یک مدل لاغرانژی به نام STRiPE^۵ استفاده شد که اخیراً مختص مدل‌سازی پلوم رودخانه طراحی شده است. از ورودی‌های این مدل می‌توان به خطوط ساحلی، موقعیت خور، پارامتر کوریولیس، شوری آب رودخانه و دریا اشاره کرد. نیروهای دینامیکی خارجی عبارت از سرعت و جهت باد، سرعت و جهت جریانات ساحلی و دبی رودخانه هستند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های ظاهری پلوم رودخانه تنها به واسطه دبی رودخانه مشخص نمی‌شود، بلکه به شرایط هیدرولوگی دریا و نیروهای اتمسفری نیز وابسته است. با مقایسه ابعاد پلوم استخراج شده از مدل و سنجش‌از دور، ارتباط بین دبی رودخانه با مساحت پلوم آن به دست آمد (Osadchiev, 2015). پلوم رودخانه ارونده بعنوان بزرگ‌ترین رودخانه منطقه و اصلی‌ترین منبع آب شیرین خلیج فارس، دارای اهمیت فراوانی ازنظر زیست‌محیطی، آلودگی، شیلاتی، اقتصادی، ناوبری و غیره است. از طرفی تأثیرپذیری ویژگی‌های مختلف پلوم این رودخانه از حوضه‌ی آبریز بسیار وسیع خود در چهار کشور ایران، عراق، ترکیه و سوریه با مساحتی بیش از نهصد هزار کیلومترمربع که سکونت‌گاه پنجاه و چهار میلیون نفر انسان است، اهمیت شناخت و مطالعه دقیق آن را دوچندان می‌کند (Un-Escwa, 2013). تغییرات شوری، کدری آب و جریانات جزر و مدی نیز از جمله عوامل مؤثر بر شرایط دهانه و پلوم رودخانه ارونده هستند (Nozarpour et al., 2018). بندر خرمشهر و بندر آبادان که در حاشیه رودخانه ارونده قرار گرفته‌اند، از مهم‌ترین بنادر در مجاورت رودخانه ارونده هستند که از گذشته تاکنون از نظر اقتصادی نقش حائز اهمیتی در چرخه اقتصادی کشور دارند (Abdolkhanian et al., 2018). کاهش دبی رودخانه ارونده به دلیل سدسازی‌های بی‌رویه (Kämpf & Sadrinasab, 2005) و تغییرات اقلیمی، مطالعه و بررسی ویژگی‌های این رودخانه از جمله پلوم آن را ضروری می‌سازد. تحقیقات قبلی انجام شده با روش‌های میدانی و عددی، حاکی از لایه‌بندی آب در دهانه‌ی رودخانه است (FayazMohammadi, 2017) و (Abdullah et al., 2016).

(شفیعی و صدری نسب، ۱۳۸۵) با استفاده از مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی کوهیرنس^۶ ساختار پلوم در دهانه‌ی ورودی رودخانه‌ی ارونده به خلیج فارس را بررسی کردند. در این مدل شبکه‌ای با قدرت تفکیک مکانی ۴ دقیقه مورد استفاده قرار گرفت که محدوده آن تمام خلیج فارس و قسمت‌هایی از دریای عمان بود. دبی رودخانه، دما

1-Sirocco winds
 2-Alexander Osadchiev
 3-Mzymta

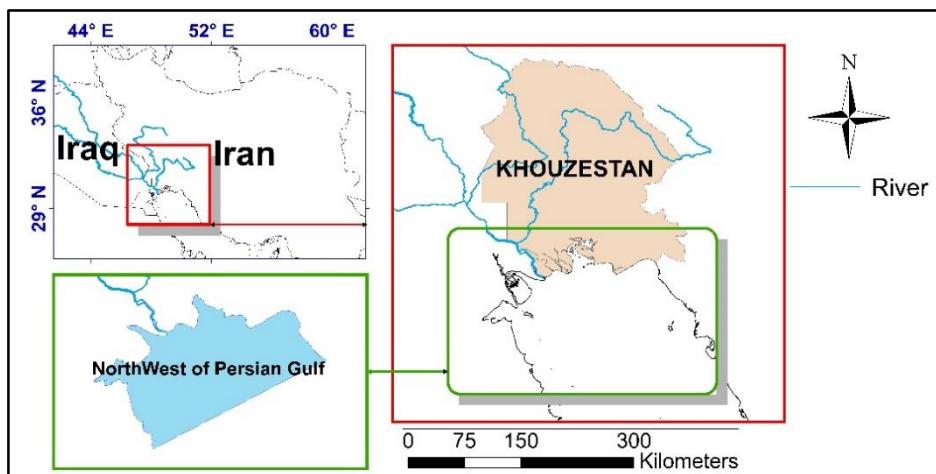
4-Sochi
 5-Surface-Trapped River Plume Evolution
 6-COHERENS

و شوری مرز باز این مدل به صورت میانگین ماهیانه به مدل وارد شد و مدل در ۵ لایه در مختصات سیگما اجرا شد. نتایج نشان داد که در دهانه‌ی رودخانه ارونده، آب شیرین آن به صورت لایه‌ی همگن، بالای آب شور دریا در فلات قاره حرکت می‌کند. پلوم این رودخانه، بر اثر نیروی کوریولیس به سمت راست چرخیده و یک چرخش آنتی‌سیکلون را در قسمت شمال غربی خلیج‌فارس و جریان ساحلی شناور در اطراف قطر و عربستان ایجاد می‌کند (Shafiee & Sadrinasab, 2006).

بنابراین تعیین نوع پلوم رودخانه‌ی ارونده که آشکارکننده‌ی ویژگی‌ها و نحوه رفتار پلوم آن در شرایط مختلف است، از منظر علوم زیستی و غیرزیستی، آلودگی، شیلاتی، مباحث مربوط به رسوب‌گذاری و ناویری، مدیریت منابع آب و غیره یک ضرورت است. به همین دلیل در این تحقیق با به‌کارگیری مدل عددی به این مهم پرداخته شده است. برای تشخیص نوع پلوم رودخانه می‌باشد عوامل تعیین‌کننده‌ی آن بررسی شود. به این منظور، ساختار ستون آب و لایه‌بندی آن در دهانه‌ی رودخانه بررسی شد. شوری سطحی برای تعیین مرز پلوم رودخانه و ابعاد آن مورد استفاده قرار گرفت. سپس تأثیر باد منطقه بر شکل و گستردگی پلوم تحلیل شد. استفاده از اطلاعات عمق‌سنگی دقیق (داده‌های عمق‌سنگی سازمان جغرافیایی ارش (شماره چارت ۱۲۶۹/۱) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) و شبکه مدل با قدرت تفکیک مکانی بالا (۲۰۰ متر در دهانه رودخانه)، بررسی اثربازی پلوم رودخانه از باد غالب منطقه و اجرای مدل در ۲۰ لایه در مختصات سیگما با قابلیت نازک‌سازی لایه سطحی از ویژگی‌های این تحقیق به شمار می‌رود که تاکنون انجام نشده است. نازک‌سازی لایه سطحی که از ویژگی‌های بارز مدل FVCOM است، سبب تدقیق نتایج مدل در لایه سطحی می‌شود.

۲- مواد و روش

محدوده‌ی مورد مطالعه در این تحقیق شامل شمال غرب خلیج‌فارس و مشخصاً دهانه‌ی رودخانه ارونده است. با این وجود بهمنظور مدل سازی چرخش خلیج‌فارس و بررسی تأثیر آن در دهانه‌ی رودخانه ارونده، پارامترهای هیدروفیزیک و هیدرودینامیک کل خلیج‌فارس و بخش‌هایی از دریای عمان شبیه‌سازی شد. رودخانه ارونده از به هم پیوستن رودخانه‌های دجله، فرات و کارون بزرگ شکل می‌گیرد. (Fayaz Mohammadi & Ashtari Larki, 2021). طول رودخانه‌ی ارونده حدود ۱۹۰ کیلومتر و مسیر کلی آن جنوب‌شرقی و شیب متوسط آن نزدیک به صفر است (Hashemi et al., 2018). در شکل ۱ جزئیات مربوط به محدوده مطالعه ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت رودخانه ارونده و حوضه آبریز آن در کشور ایران (استان خوزستان) و عراق و همچنین شمال غرب خلیج فارس به عنوان محدوده مورد مطالعه

Fig (1): Location of The Arvand River and its watershed in Iran (Khuzestan province) and Iraq and study area: northwest of the Persian Gulf

ابتدا داده‌های مورد نیاز اجرای مدل جمع‌آوری شد. مهم‌ترین این داده‌ها شامل اطلاعات عمق‌سنگی منطقه، اطلاعات هواشناسی شامل سرعت و جهت باد، مؤلفه‌های شار گرمایی، اطلاعات جزر و مدي، اطلاعات رودخانه شامل دبی، دما و شوری آب ورودی و اطلاعات پارامترهای فیزیکی در مرز باز مدل است که نحوه‌ی استفاده و اعمال آن‌ها به مدل، به صورت مجزا در ادامه ارائه گردیده است.

به منظور شبیه‌سازی پلوم رودخانه ارونده، از مدل حجم محدود FVCOM استفاده شده که مدلی حجم متناهی بوده و دارای سطح آزاد، شبکه غیرساختمانیافته و معادلات اصلی حاکم بر اقیانوس است. مدل FVCOM از شکل انتگرالی معادلات حاکم استفاده می‌کند که درروش حجم محدود شرایط پایستگی جرم در حوضه محاسباتی دقیق‌تر ارضا می‌شود. معادلات اساسی مدل شامل معادلات تکانه، پیوستگی، دما، شوری و چگالی است (Chen et al., 2006).

در مدل FVCOM، امکان انتخاب روش پارامتری اسماگورینسکی برای ضرایب پخش افقی به صورت زیر وجود دارد (Smagorinsky, 1963).

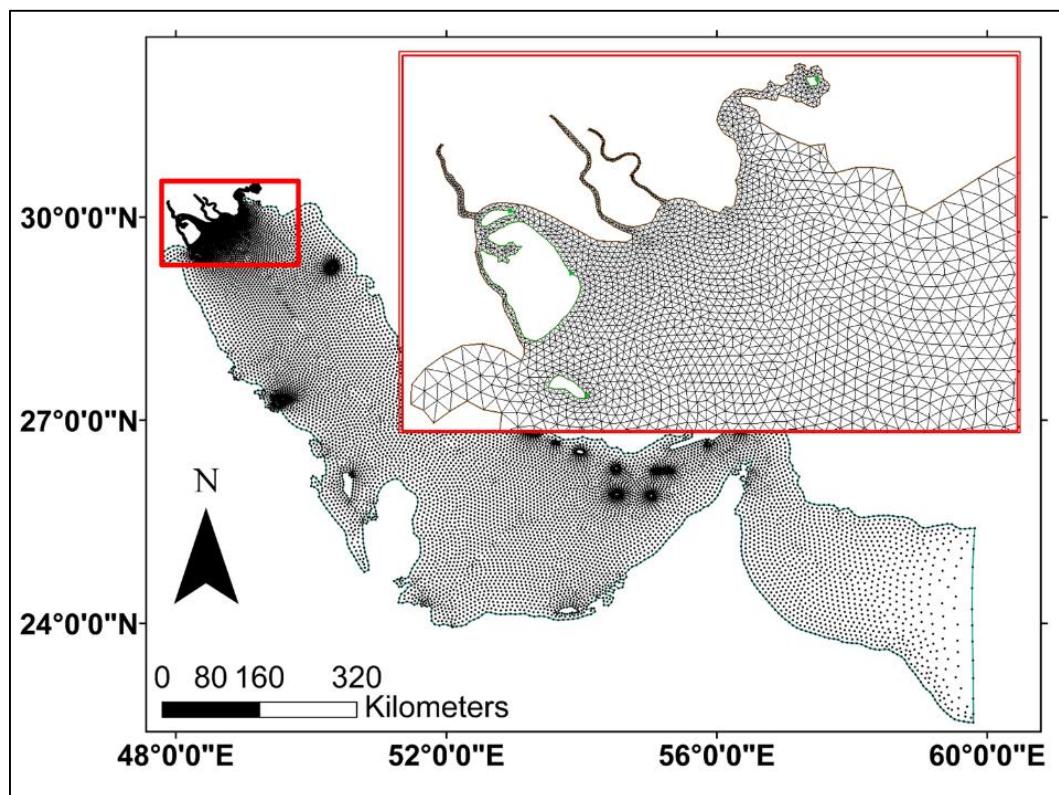
$$A_m = 0.5C\Omega^u \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

به طوری که C پارامتر ثابت است و Ωu مساحت (المان‌های کنترل اندازه حرکت)، Am به گرادیان سرعت و مساحت المان (تفکیک مدل) بستگی دارد (با کاهش اندازه یا کاهش گرادیان سرعت افقی کاهش می‌یابد). برای پارامترهای اسکالر (مانند دما) نیز رابطه‌ای مشابه به صورت زیر وجود دارد که متناسب با ناحیه‌ی المان کنترل و گرادیان افقی غلظت پارامتر موردنظر است (Smagorinsky, 1963).

$$A_m = 0.5C\Omega^u \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

در حالی که ناحیه ζ و P_r عدد پرانتل است (Smagorinsky, 1963). در FVCOM از نسخه به روز مدل تلاطمی MY2.5 به منظور پارامتریندی ضرایب لزجت پیچکی قائم و انتشار گرمایی قائم استفاده می‌شود که q انرژی جنبشی تلاطمی است و ۱ تلاطم بزرگ مقیاس است (Mellor & Yamada, 1982).

اگرچه محدوده، دهانه‌ی رودخانه ارونند در شمال‌غربی خلیج فارس است، اما باهدف اعمال اثر جریانات محلی بر ویژگی‌های پلوم، کل خلیج فارس و قسمت‌هایی از دریای عمان شبیه‌سازی و پس از آن، تحقیق بر محدوده دهانه رودخانه متمن کز شد. شبکه محاسباتی با قدرت تفکیک مکانی متغیر (فاصله‌ی نقاط شبکه در حدود ۳۲ کیلومتر در مرز باز تا ۲۰۰ متر در دهانه‌ی رودخانه متغیر است) با نرم‌افزار تخصصی (SMS 10.1, 2010) تولید شد. از دو سری داده‌های عمق‌سنگی شامل داده‌های GEBCO_08 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه (Ioc, 2003) و داده‌های سازمان جغرافیایی ارتش در دهانه‌ی رودخانه (شماره چارت ۱۲۶۹/۱) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. در شکل ۲ شبکه‌ی محاسباتی در کل محدوده‌ی مدل و با جزئیات بیشتر در دهانه‌ی رودخانه ارونند ارائه شده است.



شکل (۲): شبکه‌ی محاسباتی استفاده‌شده در مدل
 Fig (2): Numerical grids used in the model

روش پایداری^۱ CFL به شکل $\Delta t_E = \Delta L / \sqrt{gD}$ برای محاسبه‌ی گام زمانی مد خارجی^۲ استفاده می‌شود، که ΔL کوچکترین طول المان در شبکه، D عمق متناظر با المان و g نیروی گرانش است. گام زمانی مد داخلی^۳ مدل بهجهت کارایی بیشتر ده برابر گام زمانی مد خارجی انتخاب می‌شود (Chen et al., 2006). در این مدل گام زمانی مد داخلی و مد خارجی به ترتیب برابر ۳۰ و ۳ ثانیه انتخاب شد. تغییرات سطح آب در مرز باز، به صورت دامنه و فاز مشتمل بر چهار مؤلفه اصلی جزر و مدي منطقه (M2, S2, K1, O1) حاصل از اطلاعات از مدل TMD^۴ (Padman & Erofeeva, 2005) به مدل اعمال شد. داده‌های متغیر (در مکان و زمان) باد، بارش، تبخیر و شار گرمایی از پایگاه ECMWF^۵ (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data>) به صورت ۶ ساعته با دقیق مکانی ۰/۲۵ درجه استخراج و پس از درون‌یابی بر روی شبکه محاسباتی، به مدل اعمال شد. داده‌های نیم‌رخ

1-Courant-Friedrich Levy

2-External Mode

3-Internal Mode

4-Tidal Model Driver

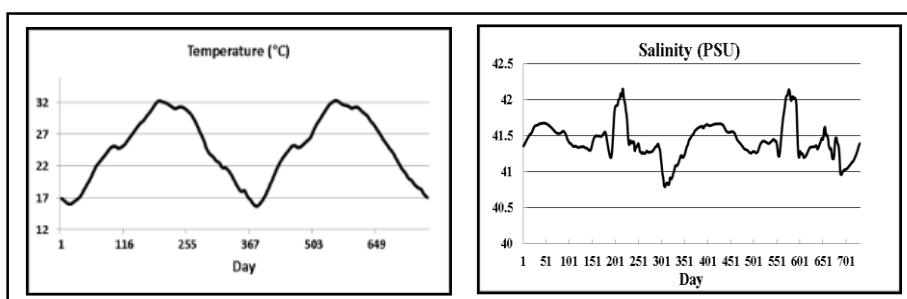
5-European Center for Medium-Range Weather Forecasts

دما و شوری مرز باز از خروجی مدل HYCOM (<http://hycom.org>) که با اطلاعات اندازه‌گیری و ماهواره مقایسه گردیده استفاده شد.

ورود آب شیرین به مدل، در ابتدای رودخانه‌ی ارونند با دبی میانگین سالانه ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه، دمای بین ۱۲ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد (FayazMohammadi, 2005 ppt2 Kämpf & Sadrinasab, 2005) و شوری برابر با و به صورت لایه‌بندی (هشتاد درصد در لایه‌ی سطحی و مابقی به صورت کاهشی در لایه‌های زیرین) اعمال شد.

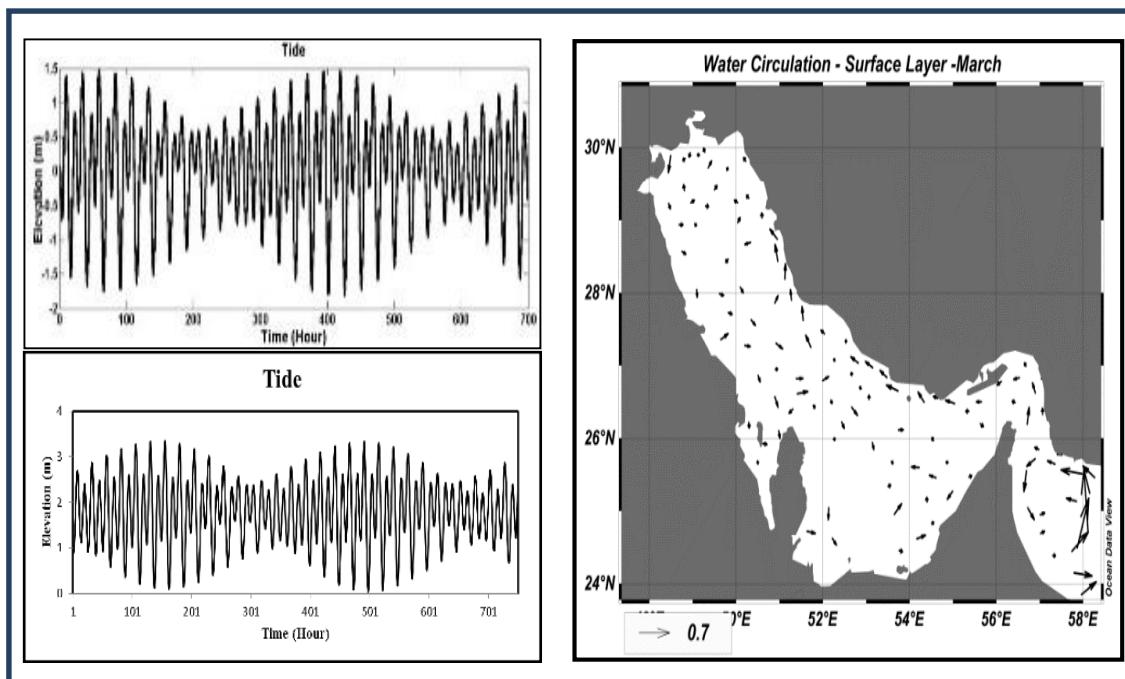
شرایط اولیه مدل (ابتدای سال میلادی) در کل حوضه شامل دما، شوری و سرعت جریان به ترتیب ۱۸ درجه سانتی‌گراد، ۳۵ ppt و صفر و همچنین خروجی مدل TMD به عنوان اطلاعات تراز سطح آب در نظر گرفته شد.

مدل در مد کژفشاری^۱ و در ۲۰ لایه با ضخامت متغیر (لایه‌های سطحی با ضخامت کمتر) در مختصات سیگما اجرا شده است. ابتدا سکون آزمایی انجام شد (اجرای مدل بدون هیچ نیرویی) و ناپایداری‌های ناشی از شبکه و عمق‌سنگی رفع شد. سپس با اضافه کردن مؤلفه‌های جزر و مدی، مؤلفه‌های باد، ورودی رودخانه، پارامترهای دما و شوری در گره‌های مرز باز و به صورت سری زمانی و داده‌های شار گرمایی اجرا شد. مدل پس از پانزده سال اجرا، به پایداری رسید. شکل (۳) نمودار تکرار پذیری دما و شوری سطحی دو سال آخر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تأثیر پذیری پلوم از شرایط باد، عاملی مهم در تعیین نوع پلوم است، حالات متعددی از باد منطقه (Komijane et al., 2014) به مدل اعمال و تأثیر آن بر شکل و مساحت پلوم آزمایش شد.



شکل (۳): نمودار سری زمانی دما و شوری در دو سال آخر مدل سازی
Fig (3): Time series of temperature and salinity in the last two years of modelling

در شکل ۴ نیز تطابق نتایج مدل در خصوص چرخش پادساعت‌گرد در خلیج فارس (Reynolds, 1993) و تطابق خروجی جزر و مد مدل با داده‌های آدمیرالتی^۲ در دهانه‌ی رودخانه ارائه شده است.

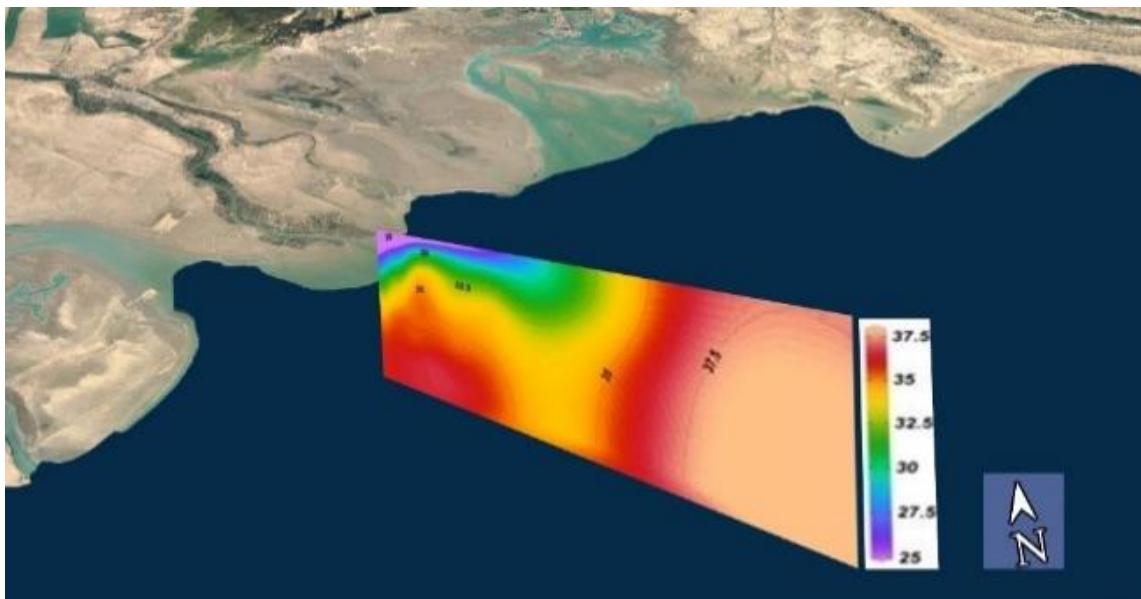


شکل (۴): چرخش پادساعتگرد خلیج فارس (سمت راست) و مقایسه‌ی داده‌های آدمیرالی در دهانه رودخانه‌ی ارونده

Fig (4): Counterclockwise circulation of the Persian Gulf (right) and Comparison of model-simulated sea surface elevation with Admiralty tide data at the mouth of the Arvand River

۳- یافته‌ها و بحث

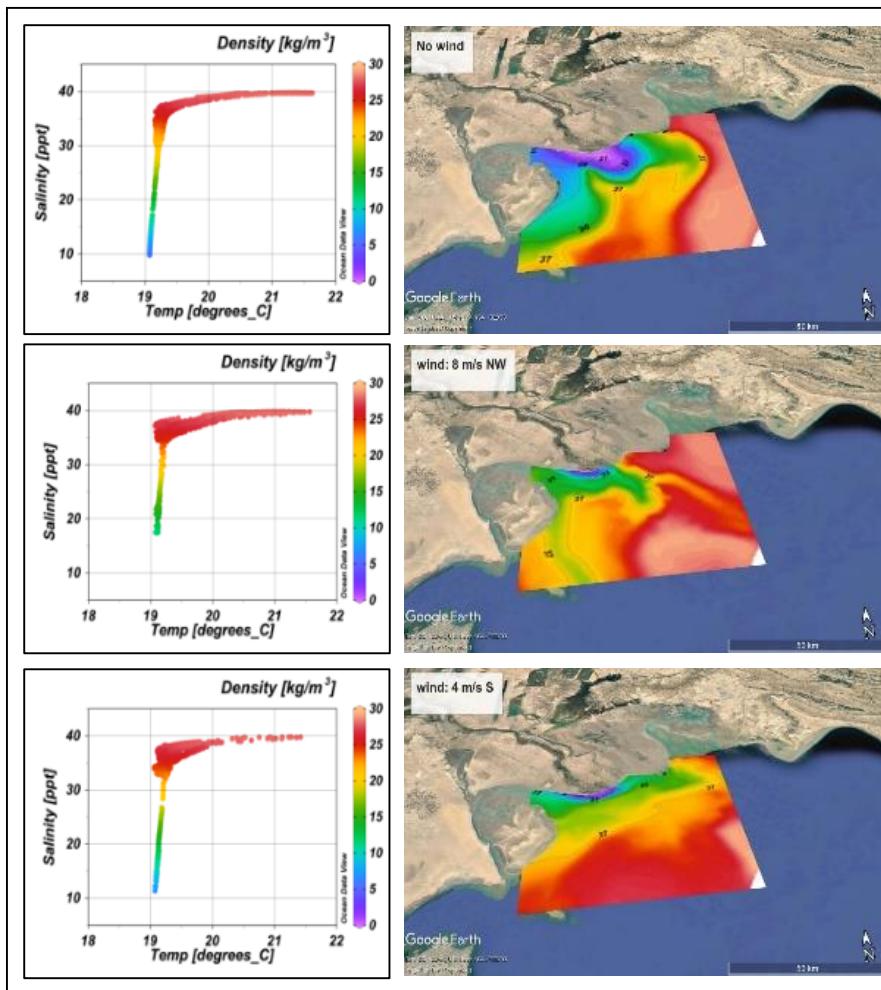
مقایسه اطلاعات آماری پلوم‌ها نشان داده که انحراف معيار و واریانس مساحت پلومی با مرز کانتور شوری ppt ۳۷ از دیگر پلوم‌ها (پلوم با مرز ۳۶ تا ۳۲ ppt) بیشتر است. به عبارتی تأثیر باد و دبی رودخانه بر روی پلومی با مرز شوری ۳۷ ppt، واضح‌تر است. به همین دلیل، کانتور شوری ppt ۳۷ به عنوان مرز پلوم تعیین شد. شکل ۵ مقطع عرضی شوری روبروی دهانه‌ی رودخانه ارونده نشان می‌دهد. در این شکل لایه‌بندی ستون آب کاملاً مشخص است؛ در سطح، آب کم‌شور رودخانه بدون برخورد با بستر، به سمت دریا حرکت می‌کند. عدم برخورد لایه کم‌شور آب رودخانه با بستر سبب کاهش اصطکاک و تأثیرپذیری آن لایه از نیروی باد خواهد شد. این موضوع در شکل‌های بعدی بررسی شده است.



شکل (۵): مقطع عرضی شوری در دهانه رودخانه ارونده

Fig (5): Cross-section of salinity at the mouth of the Arvand River

در شکل های ۶ شوری سطحی دهانه رودخانه را با اعمال دبی ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه و در سه وضعیت بدون باد، باد جنوبی و باد شمال غربی نشان داده شده است. همچنین نمودارهای پراکنش دما_شوری از همان لایه سطحی نیز در سمت راست شوری سطحی نمایش داده شده است. با دقت بر این نتایج کاملاً مشخص است که گستردگی پلوم سطحی در سه وضعیت باد کاملاً متفاوت هستند، در حالی که نمودار پراکنش دما_شوری از همان سطحی در همان محدوده کاملاً مشابه یکدیگرند. به عبارتی تفاوت در گستردگی پلوم سطحی در این سه وضعیت، تنها به دلیل جابجایی توده آب سطحی است. این نتایج نشان دهنده لایه بندی ستون آب در دهانه رودخانه و تأثیرپذیری شکل و گستردگی پلوم از وضعیت باد است.

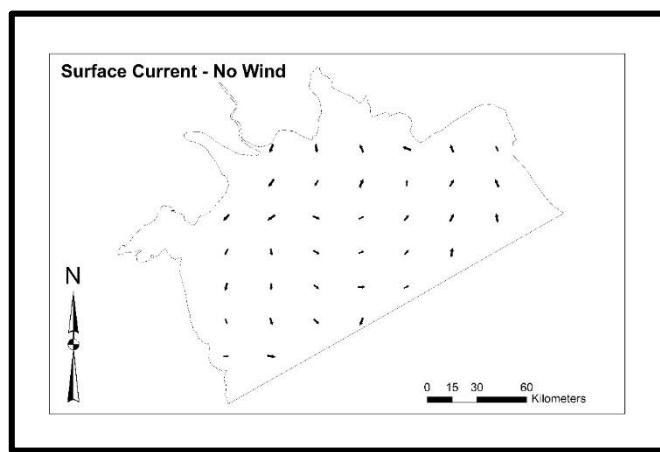


شکل (۶): شوری سطحی در حالت‌های از بالا به پائین به ترتیب بدون باد، باد ۸ متر بر ثانیه شمال‌غربی و ۴ متر بر ثانیه جنوبی و سمت راست نمودار پراکندگی دما-شوری متناظر برای هر حالت.

Fig (6): Sea surface salinity in windless (top), wind 8 m/s NW (middle) and 4 m/s S (bottom) conditions and corresponding T-S diagram on the right side

در شکل ۷ جریانات سطحی شمال‌غرب خلیج‌فارس و دهانه رودخانه در شرایط بدون نیروی باد ارائه شده است. در این شکل چرخش پادساعت‌گرد خلیج‌فارس در شمال‌غرب آن کاملاً مشهود است. از آنجاکه شبکه مدل در دهانه‌ی رودخانه دارای قدرت تفکیک مکانی بالا است، به همین دلیل برای نمایش واضح‌تر، نتایج جریانات سطحی مدل بر روی شبکه‌ای با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر استخراج و ترسیم شد. با توجه به عدم وزش باد، چرخش

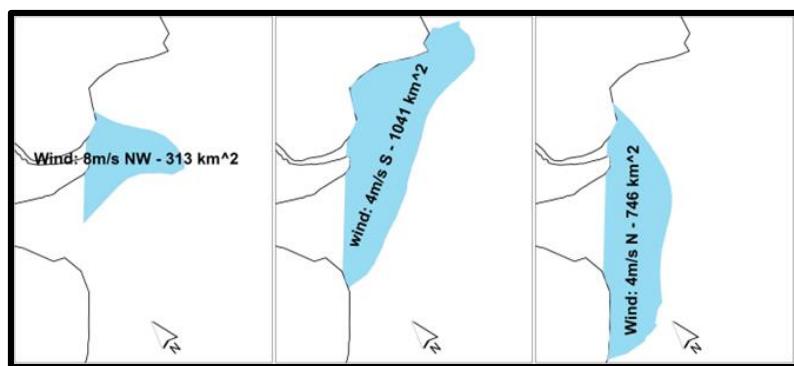
پادساعتگرد شمال غرب خلیج فارس به همراه نیروی کوریولیس سبب انحراف جریان رودخانه به سمت سواحل جنوبی می شود.



کل (۷) جریانات سطحی شمال غرب خلیج فارس و دهانه رودخانه ارونده بدون اعمال نیروی باد به مدل

Fig (7): Simulated surface circulation in the northwest of the Persian Gulf and the mouth of the Arvand River in windless condition

در شکل ۸ ابعاد پلوم رودخانه به ازای دبی ۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه و در سه حالت مختلف باد ۴ متر بر ثانیه شمالی و جنوبی و ۸ متر بر ثانیه شمال غربی ارائه شده است. همان طور که مشخص است شکل، جهتگیری و ابعاد پلوم کاملاً وابسته به شرایط باد است. تغییر جهت باد ۴ متر بر ثانیه از شمال به جنوب، سبب تغییر حدود ۳۰۰ کیلومتر مربعی مساحت پلوم می شود. در این شکل ها وابستگی کامل پلوم به باد واضح است.



شکل (۸): ابعاد پلوم رودخانه ارونده به ازای دبی ۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه و سه حالت مختلف باد منطقه

Fig (8): Arvand river plume area and dimensions for three different wind conditions (river discharge 300 m³/h)

۴-نتیجه‌گیری

نتایج تحقیقات قبلی انجام شده در این منطقه شامل چرخش پادساعت‌گرد آب (Reynolds, 1993)، لایه‌بندی آب در دهانه رودخانه (Kämpf & Sadrinasab, 2005) و انحراف عمومی آب شیرین رودخانه به سمت سواحل جنوبی (Shafiee & Sadrinasab, 2006)، همگی در این مطالعه نیز تأیید شد. علاوه‌بر این‌ها، نتایج حاکی از لایه‌بندی شدید و مجزا ستون آب در دهانه رودخانه و قرارگیری آب کم شور رودخانه به روی آب دریا است. بدون اعمال نیروی باد به مدل، چرخش پادساعت‌گرد در شمال‌غرب خلیج فارس مشهود است. به همین دلیل، بدون وزش باد، پلوم رودخانه متأثر از نیروی کوریولیس و چرخش عمومی آب منطقه به سمت سواحل جنوبی گستردگی شود. جهت‌گیری پلوم با اعمال باد جنوبی به سمت شمال و با اعمال باد شمال‌غربی به سمت جنوب‌شرق است. به طور کلی، لایه‌بندی شدید ستون آب، تاثیرپذیری گستردگی پلوم از وضعیت باد و یکسان بودن پارامترهای توده آب سطحی (نمودار پراکندگی دما-شوری) در هر سه وضعیت باد، همگی نشان از تشکیل پلوم سطحی در دهانه رودخانه ارond است. علاوه‌بر شکل و جهت‌گیری پلوم، ابعاد آن نیز کاملاً به شرایط باد وابسته است. بادهای موازی با ساحل، عمدتاً سبب وسیع تر شدن پلوم می‌شوند. بادهای شرقی و جنوب‌شرقی سبب نفوذ شوری آب دریا به رودخانه شده و شوری دهانه رودخانه را افزایش می‌دهند.

پلوم رودخانه و جبهه یا مرز آن، محدوده‌ای با گرادیان شدید پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است. محققان زیادی ارتباط بین جبهه‌ها و تجمع ماهی‌ها بدویزه ماهی‌های مهاجر را نشان دادند (Podesta et al., 1993). این موضوع نشان‌دهنده اهمیت شناخت نوع پلوم رودخانه‌ها و رفتار آن‌ها از منظر شیلاتی و صیادی است. با توجه به پلوم سطحی رودخانه‌ی ارونده، می‌توان جهت‌گیری پلوم این رودخانه را بر اساس شرایط باد پیش‌بینی و جهت بهره‌وری شیلاتی بکار گرفت. علاوه بر این، پیش‌بینی جهت‌گیری و گستردگی پلوم رودخانه ارونده از نظر زیست‌شناسی، آلودگی، رسوب‌گذاری و غیره نیز حائز اهمیت است.

فقدان اطلاعات در لایه‌های مرزی از جمله دلایل بروز خطا در مدل‌های عددی است. به همین دلیل جهت جبران این نقصان، در این تحقیق، مرز باز مدل در ابتدای رودخانه ارونده تعریف شد که خود سبب تحمیل هزینه‌های محاسباتی می‌شود. بنابراین انجام اندازه‌گیری‌های میدانی در دهانه رودخانه ارونده، جهت تدقیق مدل‌های عددی پیشنهاد می‌گردد. همچنین اجرای مدل‌های عددی لاغراظی مخصوص رودخانه و مقایسه نتایج، در شناخت بیشتر این محیط بسیار کارآمد خواهد بود.

۵-سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی سازمان بنادر و دریانوردی در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- منابع

- Fayaz Mohammadi, M., & Ashtari Larki, A. (2021). Field study of sediment and current of Karoun and Arvandroud rivers, in flood conditions. *Hydrogeomorphology*, 8(28), 63-80 . (In Persian)
- Hashemi, S.N., Akbarinasab, M., & Safarrad, T. (2018). The Detection of the Plume of the Arvand River Using Satellite Images. *Hydrogeomorphology*, 4(13), 147-164 . (In Persian)
- Abdolkhanian, N., Elmizadeh, H., Dadolahi Sohrab, A., Savari, A., & FayazMohammadi, M. (2018). Comparing Modeling of Pollution in Arvand River in the Dry and Wet Seasons .
- Abdullah, A.D., Gisen, J. I., van der Zaag, P., Savenije, H. H., Karim, U. F., Masih, I., & Popescu, I. (2016). Predicting the salt water intrusion in the Arvand River estuary using an analytical approach. *Hydrology and earth system sciences*, 20(10), 4031-4042 .
- Chao, S.Y., & Boicourt, W.C. (1986). Onset of estuarine plumes. *Journal of Physical Oceanography*, 16(12), 2137-2149 .
- Chen, C., Beardsley, R. C., & Cowles, G. (2006). FINITE VOLUME COASTAL OCEAN. *Oceanography*, 19(1), 78 .
- FayazMohammadi, M. (2017). Field and numerical study of tide impact on sediment transportation in Arvandroud estuary Khorramshahr University of Marine Science & Technology .
- Garvine, R.W. (1981). Frontal jump conditions for models of shallow, buoyant surface layer hydrodynamics. *Tellus*, 33(3), 301-312 .
- Garvine, R.W. (1982). A steady state model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters. *Tellus*, 34(3), 293-306 .
- Garvine, R.W. (1995). A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges. *Continental Shelf Research*, 15(13), 1585-1596 .
- Goncalves, H., Teodoro, A.C., & Almeida, H. (2012). Identification, characterization and analysis of the Douro River plume from MERIS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(5), 1553-1563.
- Kamidis, Sylaios, & Tsirintzis. (2015). Nestos River plume dynamics under variable physical forcing. *Πανελλήνια και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών*, 549-566 .
- Kämpf, J., & Sadrinasab, M. (2005). The circulation of the Persian Gulf: a numerical study. *Ocean Science Discussions*, 2(3), 129-164 .
- Komijane, F., Nasallahe, A., Nazari, N., & Naheid, S. (2014). The Persian Gulf wind analysis using meteorological synoptic stations data. *Nivar*, 38(85-84), 27-44 .

- Mellor, G.L., & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851-875 .
- Nozarpour, N., Nabavi, M., Ronagh, M., Archangi, B., & Sakhaei, N. (2018). Molecular and phylogenetic investigation of Chiromantes boulengeri (Decapoda, Brachyura, Sesarmidae) species from Arvand River .
- Padman, L., & Erofeeva, S. (2005). Tide model driver (TMD) manual. *Earth and Space research*.
- Podesta, G.P., Browder, J.A., & Hoey, J.J. (1993). Exploring the association between swordfish catch rates and thermal fronts on US longline grounds in the western North Atlantic. *Continental Shelf Research*, 13(2-3), 253-277 .
- Reynolds, R.M. (1993). Physical oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Mar Pollut Bull*, 27, 35-59 .
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3), 99-164 .
- Tarya, A., Van der Vegt, M., & Hoitink, A. (2015). Wind forcing controls on river plume spreading on a tropical continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(1), 16-35 .
- Un-Escwa, B. (2013). United Nations economic and social commission for western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *Inventory of Shared Water Resources in Western Asia*, Beirut .
- Wiseman, W., & Garvine, R. (1995). Plumes and coastal currents near large river mouths. *Estuaries*, 18(3), 509-517 .
- Xing, J., & Davies, A.M. (1999). The effect of wind direction and mixing upon the spreading of a buoyant plume in a non-tidal regime. *Continental Shelf Research*, 19(11), 1437-1483 .
- Yankovsky, A.E., & Chapman, D.C. (1997). A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *Journal of Physical Oceanography*, 27(7), 1386-1401 .
- Osadchiev, A. (2015). A method for quantifying freshwater discharge rates from satellite observations and Lagrangian numerical modeling of river plumes. *Environmental Research Letters*, 10(8), 085009.
- Falcieri, F.M., Benetazzo, A., Sclavo, M., Russo, A., & Carniel, S. (2014). Po River plume pattern variability investigated from model data. *Continental Shelf Research*, 87, 84-95.
- Sarvestani, R.S., & Sadrinasab, M. (2006). Numerical Simulation of Plume over the Arvand River 7th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS), Tehran.