



## تعیین نوع پلوم رودخانه اروند با مدل سازی عددی

عباس عینعلی<sup>۱\*</sup>، مسعود صدقی نسب<sup>۲</sup>، محمد اکبری نسب<sup>۳</sup>

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

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

۳-دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده 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 اروند آشکار شد. پلوم این رودخانه بر ویژگی‌های آب شمال غرب 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. به جهت مطالعه تأثیر باد بر ساختار پلوم، چندین حالت مختلف باد منطقه، به مدل اعمال شد. در شرایط بدون باد، پلوم رودخانه به دلیل چرخش آب شمال غرب خلیج فارس و تحت تأثیر نیروی کوریولیس به سمت جنوبی متمایل می‌شود. شکل و گستردگی پلوم با شرایط باد تغییر می‌کند؛ به نحوی که تفاوت مساحت پلوم در دو حالت باد ۴ متربرثانیه شمالی و جنوبی ۳۰۰ کیلومتر مربع است. با توجه به لایه‌بندی آشکار ستون آب دهانه رودخانه و تأثیرپذیری شدید پلوم از شرایط باد، پلوم رودخانه اروند 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). علاوه‌براین 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 بپردازند.

در طبیعت پلوم رودخانه به سه حالت مشاهده می‌شود. در حالت اول که به آن پلوم عمقی<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> گفته می‌شود، آب ورودی رودخانه به صورت لایه‌ای باریک روی آب دریا مستقر شده 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). در واقع 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 (Yankovsky & 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 گرادپان شدید پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی (دما، شوری، مواد مغذی 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 حوضه آبریز بوده و نشان دهنده شرایط و وقایع بالادست رودخانه است (Yankovsky & Chapman, 1997).

(چائو و بیوکورت<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶: ۲۱۳۷) محققانی هستند که برای نخستین بار ساختار پلوم و جریانات موازی با ساحل مربوط به آن با شبیه سازی عددی بررسی کردند (Chao & Boicourt, 1986). (اکسینگ و دیویس<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹: ۱۴۳۷) نشان دادند که تنش برشی باد<sup>۳</sup> اختلاط عمودی را افزایش داده و بر پروفایل عمودی و افقی پلوم مؤثر است (Xing & Davies, 1999). (گاروین<sup>۴</sup>، ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲: ۳۰۱ و ۲۹۳) تأثیر نیروی کوریولیس (Garvine, 1981) و (ویسمن و گاروین<sup>۵</sup>، ۱۹۹۵: ۵۰۹) تأثیرپذیری پلوم از مورفولوژی ساحل را بررسی کردند (Wiseman & Garvine, 1995). در مطالعه (کامیدیس<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۴۹)، با استفاده از مدل های عددی اثر نیروهای خارجی بر شکل گیری، اندازه و ساختار پلوم رودخانه نستوس<sup>۷</sup> 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، درحالی که اندازه آن اساساً به واسطه میزان دبی آن رودخانه تعیین می شود. گستردگی پلوم از جهت باد تبعیت می کند. اهمیت سرعت باد از آنجاست که سبب دور کردن پلوم از دهانه رودخانه شده و در همین حال اختلاط با آب های شور لایه های زیرین افزایش می یابد. با این حال تحت شرایط باد ضعیف یا بدون باد، نیروی کوریولیس غالب خواهد بود (Kamidis et al., 2014). (فالچیری<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۸۴) با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی، پلوم رودخانه پو<sup>۹</sup> در دریای آدریاتیک<sup>۱۰</sup> در شمال شرق دریای مدیترانه را بررسی کردند. این رودخانه به همراه چندین رودخانه کوچک تر نقش اساسی در فرایندهای فیزیکی، زیستی، شیمیایی و زمین شناسی 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<sup>۱۱</sup> شکل می گیرد. الگوی دوم، پلومی وسیع تر 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<sup>۱</sup> شکل می‌گیرد. به‌طور کلی سائز پلوم و الگوی جریانات تحت تأثیر دبی رودخانه است، درحالی‌که با وزش چندروزه باد شکل پلوم تغییر می‌کند (Falcieri et al., 2014). (اوسادچیف<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵ ص ۹) پلوم رودخانه‌های امزیمتا<sup>۳</sup> و سوشی<sup>۴</sup> که در سواحل شرقی دریای سیاه قرار دارند را بررسی کرد. در این تحقیق با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌سازی عددی و سنجش‌ازدور، ابعاد پلوم رودخانه بررسی و بر این اساس دبی رودخانه تخمین زده شد. در بخش مدل‌سازی تحقیق از یک مدل لاگرانژی به نام STRiPE<sup>۵</sup> 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 به‌واسطه دبی رودخانه مشخص نمی‌شود، بلکه به شرایط هیدروگرافی دریا و نیروهای اتمسفری نیز وابسته است. با مقایسه ابعاد پلوم استخراج‌شده از مدل و سنجش‌ازدور، ارتباط بین دبی رودخانه با مساحت پلوم آن به‌دست آمد (Osadchiev, 2015). پلوم رودخانه اروند به‌عنوان بزرگ‌ترین رودخانه منطقه و اصلی‌ترین منبع آب شیرین خلیج فارس، دارای اهمیت فراوانی از نظر 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 پنجاه‌وچهار میلیون نفر انسان است، اهمیت شناخت و مطالعه دقیق آن را دوچندان می‌کند (Un-Escwa, 2013). تغییرات شوری، کدري آب و جریانات جزر و مدی نیز از جمله عوامل مؤثر بر شرایط دهانه و پلوم رودخانه اروند هستند (Nozarpour et al., 2018). بندر خرمشهر و بندر آبادان که در حاشیه رودخانه اروند قرار گرفته‌اند، از مهم‌ترین بنادر در مجاورت رودخانه اروند هستند که از گذشته تاکنون از نظر اقتصادی نقش حائز اهمیتی در چرخه اقتصادی کشور دارند (Abdolkhani et al., 2018). کاهش دبی رودخانه اروند به‌دلیل سدسازی‌های بی‌رویه (Kämpf & Sadri nasab, 2005) و تغییرات اقلیمی، مطالعه و بررسی ویژگی‌های این رودخانه از جمله پلوم آن را ضروری می‌سازد. تحقیقات قبلی انجام‌شده با روش‌های میدانی و عددی، حاکی از لایه‌بندی آب در دهانه‌ی رودخانه است (Abdullah et al., 2016) و (Fayaz Mohammadi, 2017).

(شفیعی و صدقی نسب، ۱۳۸۵) با استفاده از مدل هیدرو دینامیکی سه‌بعدی کوهرینس<sup>۶</sup> ساختار پلوم در دهانه‌ی ورودی رودخانه‌ی اروند 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

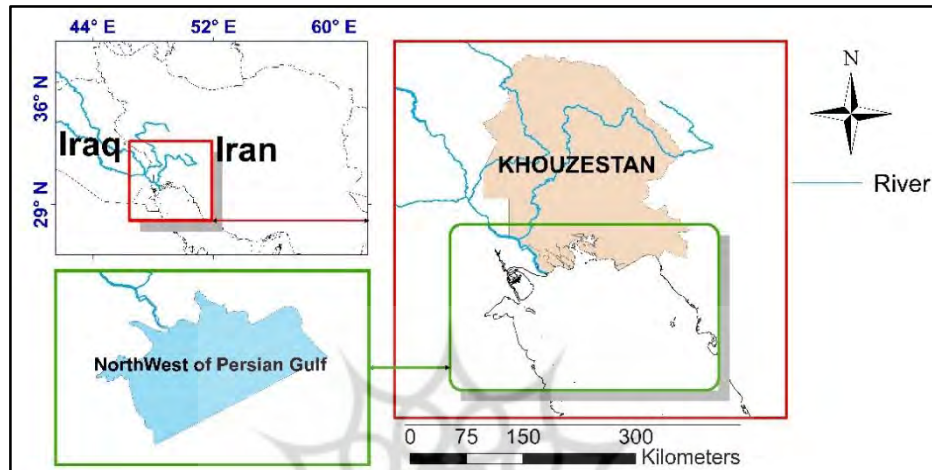
4-Sochi  
 5-Surface-Trapped River Plume Evolution  
 6-COHERENS

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 اروند، آب شیرین آن به صورت لایه‌ای 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 خلیج فارس و جریان ساحلی شناور در اطراف قطر و عربستان ایجاد می‌کند (Shafiee & Sadrinasab, 2006).

بنابراین تعیین نوع پلوم رودخانه‌ی اروند 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 ناوبری، 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 می‌بایست 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 عمق‌سنجی دقیق (داده‌های عمق‌سنجی سازمان جغرافیایی ارتش (شماره چارت ۱/۱۲۶۹) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) و شبکه مدل با قدرت تفکیک مکانی بالا (۲۰۰ متر در دهانه رودخانه)، بررسی اثرپذیری پلوم رودخانه از باد غالب منطقه و اجرای مدل در ۲۰ لایه در مختصات سیگما با قابلیت نازک‌سازی لایه سطحی از ویژگی‌های این تحقیق به‌شمار می‌رود که تاکنون انجام نشده است. نازک‌سازی لایه‌ی سطحی که از ویژگی‌های بارز مدل FVCOM است، سبب تدقیق نتایج مدل در لایه‌ی سطحی می‌شود.

## ۲- مواد و روش

محدوده‌ی مورد مطالعه در این تحقیق شامل شمال غرب خلیج فارس و مشخصاً دهانه‌ی رودخانه اروند است. با این وجود به منظور مدل‌سازی چرخش خلیج فارس و بررسی تأثیر آن در دهانه‌ی رودخانه‌ی اروند، پارامترهای هیدروفیزیک و هیدرودینامیک کل خلیج فارس و بخش‌هایی از دریای عمان شبیه‌سازی شد. رودخانه اروند از به هم پیوستن رودخانه‌های دجله، فرات و کارون بزرگ شکل می‌گیرد. (Fayaz Mohammadi & Ashtari Larki, 2021). طول رودخانه‌ی اروند حدود ۱۹۰ کیلومتر و مسیر کلی آن جنوب شرقی 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 اروند و حوضه آبریز آن در کشور ایران (استان خوزستان) و عراق و همچنین شمال غرب خلیج فارس به عنوان محدوده‌ی 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 عمق‌سنجی منطقه، اطلاعات هواشناسی شامل سرعت و جهت باد، مؤلفه‌های شار گرمایی، اطلاعات جزر و مدی، 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 اروند، از مدل حجم محدود FVCOM استفاده شده که مدلی حجم متناهی بوده و دارای سطح آزاد، شبکه غیرساختاریافته و معادلات اصلی حاکم بر اقیانوس است. مدل FVCOM از شکل انتگرالی معادلات حاکم استفاده می‌کند که در روش 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).

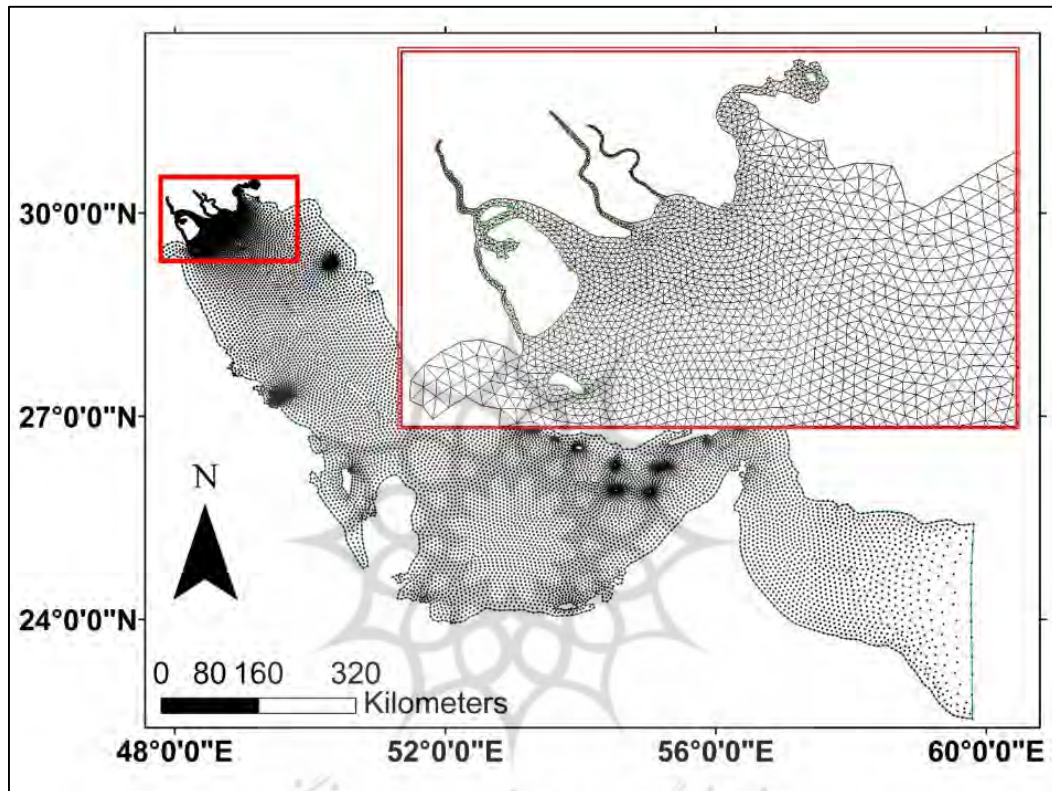
$$A_m = 0.5C\Omega^u \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

به طوری که  $C$  پارامتر ثابت است و  $\Omega u$  مساحت (المان های کنترل اندازه حرکت)،  $Am$  به گرادیان سرعت و مساحت المان (تفکیک مدل) بستگی دارد (با کاهش اندازه یا کاهش گرادیان سرعت افقی کاهش می یابد). برای پارامترهای اسکالر (مانند دما) نیز رابطه ای مشابه به صورت زیر وجود دارد که متناسب با ناحیه ی المان کنترل و گرادیان افقی غلظت پارامتر مورد نظر 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  $\Omega^2$  و  $P_r$  عدد پرانتل است (Smagorinsky, 1963). در FVCOM از نسخه به روز مدل تلاطمی MY2.5 به منظور پارامتر بندی ضرایب لزجت پیچکی قائم و انتشار گرمایی قائم استفاده می شود که  $q$  انرژی جنبشی تلاطمی است و  $l$  تلاطم بزرگ مقیاس است (Mellor & Yamada, 1982).

اگرچه محدوده، دهانه ی رودخانه اروند در شمال غربی خلیج فارس است، اما باهدف اعمال اثر جریانات محلی بر ویژگی های پلوم، کل خلیج فارس و قسمت هایی از دریای عمان شبیه سازی و پس از آن، تحقیق بر محدوده دهانه رودخانه متمرکز شد. شبکه محاسباتی با قدرت تفکیک مکانی متغیر (فاصله ی نقاط شبکه در حدود ۳۲ کیلومتر در مرز باز تا ۲۰۰ متر در دهانه ی رودخانه متغیر است) با نرم افزار تخصصی (SMS 10.1, 2010) تولید شد. از دو سری داده های عمق سنجی شامل داده های GEBCO\_08 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه (Ioc, 2003) و داده های سازمان جغرافیایی ارتش در دهانه ی رودخانه (شماره چارت ۱/۱۲۶۹) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. در شکل ۲ شبکه ی محاسباتی در کل محدوده ی مدل و با جزئیات بیشتر در دهانه ی رودخانه اروند ارائه شده است.



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

روش پایداری  $CFL^1$  به شکل  $\Delta t_E = \Delta L / \sqrt{gD}$  برای محاسبه‌ی گام زمانی مد خارجی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود، که  $\Delta L$  کوچک‌ترین طول المان در شبکه،  $D$  عمق متناظر با المان و  $g$  نیروی گرانش است. گام زمانی مد داخلی<sup>۳</sup> مدل به جهت 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 مدی منطقه (M2, S2, K1, O1) حاصل از اطلاعات از مدل TMD<sup>۴</sup> (Padman & Erofeeva, 2005) به مدل اعمال شد. داده‌های متغیر (در مکان و زمان) باد، بارش، تبخیر و شار گرمایی از پایگاه ECMWF<sup>۵</sup> (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data>) به صورت ۶ ساعته با دقت مکانی ۰/۲۵ درجه استخراج و پس از درون‌یابی بر روی شبکه محاسباتی، به مدل اعمال شد. داده‌های نیم‌رخ

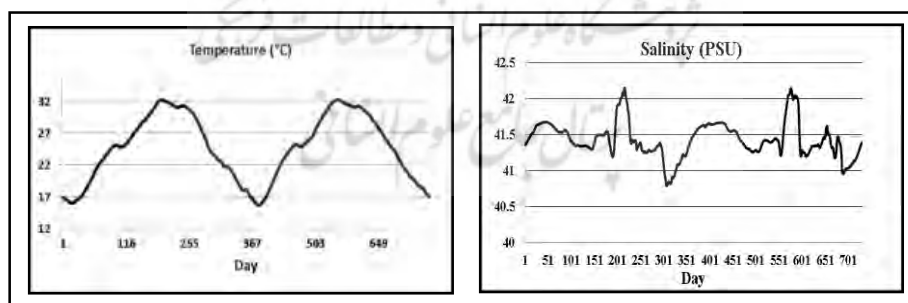
1-Courant-Friedrich Levy  
2-External Mode  
3-Internal Mode

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 اندازه گیری و ماهواره مقایسه گردیده، استفاده شد.

ورود آب شیرین به مدل، در ابتدای رودخانهی اروند با دبی میانگین سالانه ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه، دمای بین ۱۲ تا ۳۲ درجه سانتی گراد (Kämpf & Sadrinasab, 2005) و شوری برابر با ppt2 (FayazMohammadi, 2017) و به صورت لایه بندی (هشتاد درصد در لایه ی سطحی و مابقی به صورت کاهشی در لایه های زیرین) اعمال شد. شرایط اولیه مدل (ابتدای سال میلادی) در کل حوضه شامل دما، شوری و سرعت جریان به ترتیب ۱۸ درجه سانتی گراد، ppt 35 و صفر و همچنین خروجی مدل TMD به عنوان اطلاعات تراز سطح آب در نظر گرفته شد. مدل در مد کثرفشاری<sup>۱</sup> و در ۲۰ لایه با ضخامت متغیر (لایه های سطحی با ضخامت کمتر) در مختصات سیگما اجرا شده است. ابتدا سکون آزمایشی انجام شد (اجرای مدل بدون هیچ نیرویی) و ناپایداری های ناشی از شبکه و عمق سنجی رفع شد. سپس با اضافه کردن مؤلفه های جزر و مدی، مؤلفه های باد، ورودی رودخانه، پارامترهای دما و شوری در گره های مرز باز و به صورت سری زمانی و داده های شار گرمایی اجرا شد. مدل پس از پانزده سال اجرا، به پایداری رسید. شکل (۳) نمودار تکرارپذیری دما و شوری سطحی دو سال آخر شبیه سازی را نشان می دهد. با توجه به اینکه تأثیرپذیری 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.



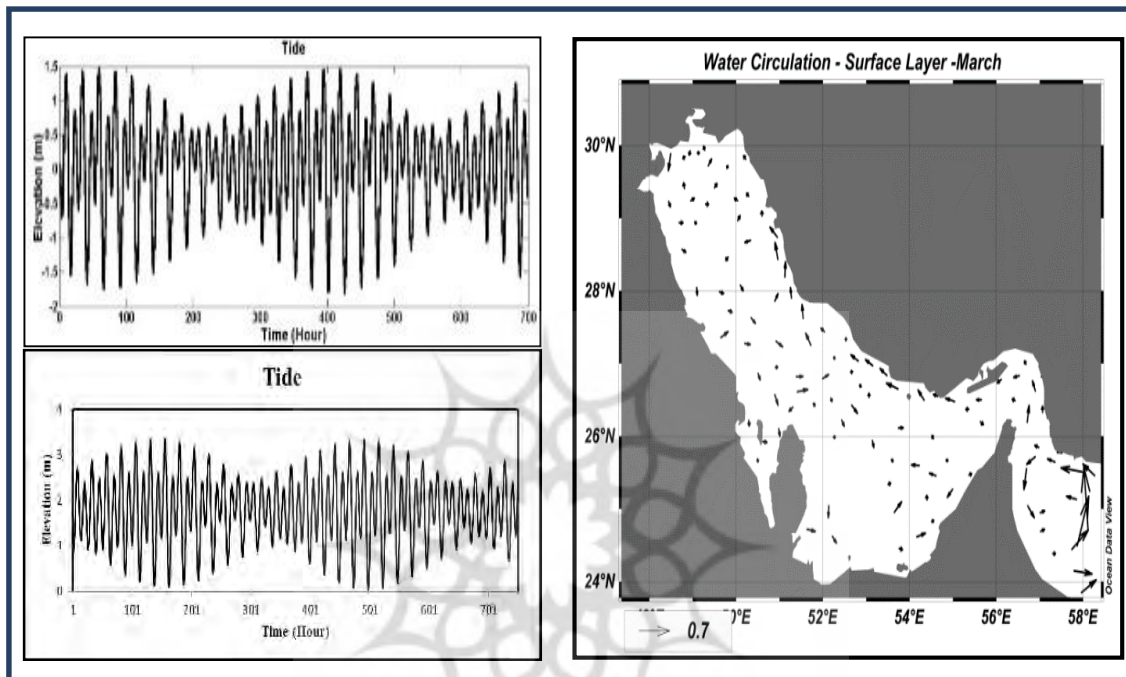
شکل (۳): نمودار سری زمانی دما و شوری در دو سال آخر مدل سازی

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 پادساعت گرد در خلیج فارس (Reynolds, 1993) و تطابق خروجی جزر و مد مدل با داده های آد میرالتی<sup>۲</sup> در دهانه ی رودخانه ارائه شده است.

1-Baroclinic

2-Admiralty (<https://www.admiralty.co.uk/>)

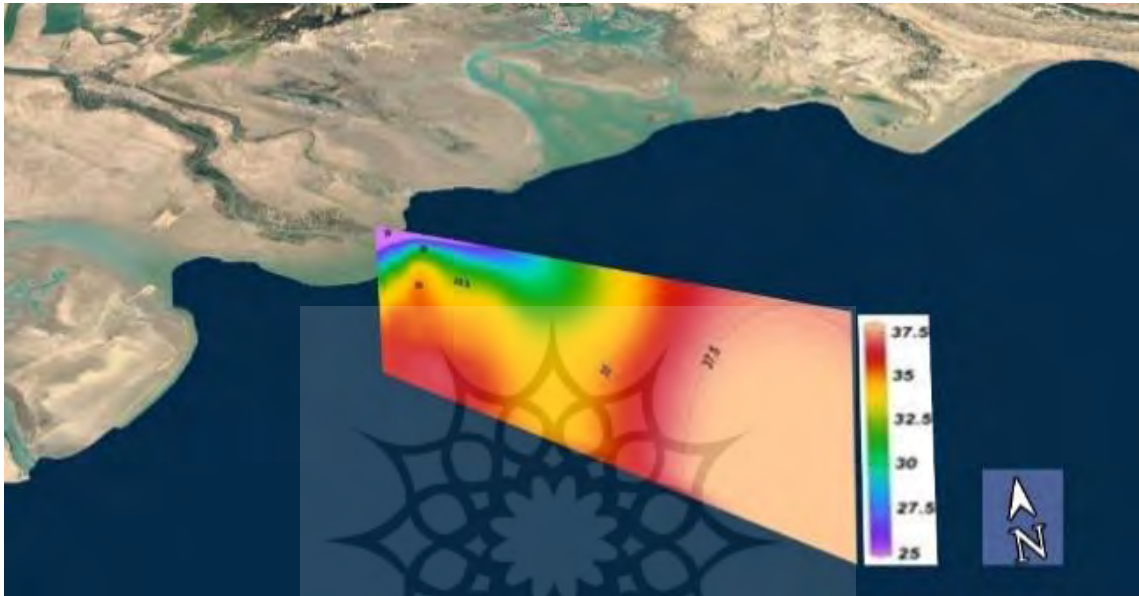


شکل (۴): چرخش پادساعت گرد خلیج فارس (سمت راست) و مقایسه‌ی داده‌های مدل با داده‌های آدمیرالتی در دهانه رودخانه‌ی اروند

**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

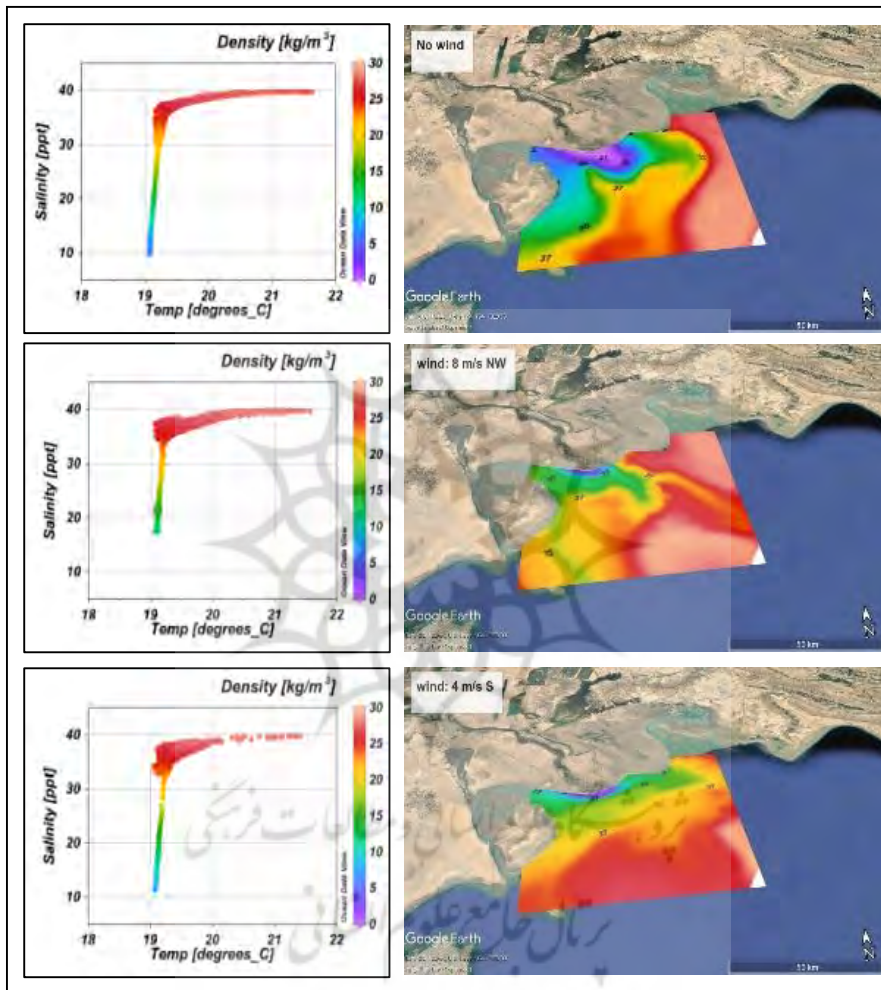
مقایسه اطلاعات آماری پلوم‌ها نشان داده که انحراف معیار و واریانس مساحت پلومی با مرز کانتور شوری ppt 37 از دیگر پلوم‌ها (پلوم با مرز ۳۲ تا ppt 36) بیشتر است. به عبارتی تأثیر باد و دبی رودخانه بر روی پلومی با مرز شوری ppt 37، واضح‌تر است. به همین دلیل، کانتور شوری ppt 37 به‌عنوان مرز پلوم تعیین شد. شکل ۵ مقطع عرضی شوری روبروی دهانه‌ی رودخانه‌ی اروند را 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 اروند

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. هم چنین 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، درحالی که نمودار پراکنش دما-شوری لایه سطحی در همان محدوده‌ی 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 دهانه‌ی رودخانه و تأثیرپذیری شکل و گستردگی پلوم از وضعیت باد است.

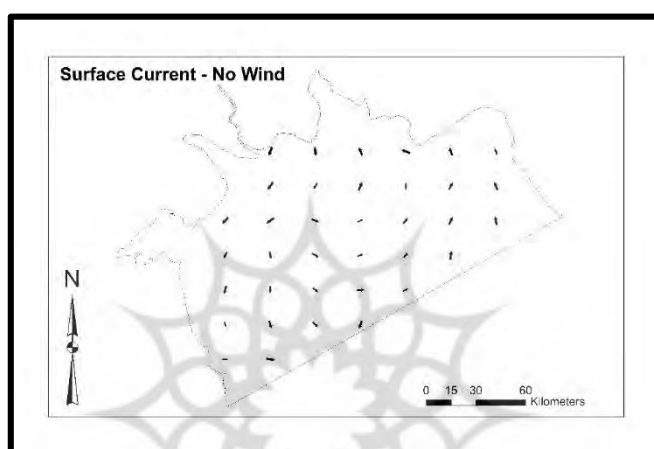


شکل (۶): شوری سطحی در حالت‌های از بالا به پائین به ترتیب بدون باد، باد ۸ متر بر ثانیه شمال غربی و ۴ متر بر ثانیه جنوبی و سمت راست نمودار پراکندگی دما-شوری متناظر برای هر حالت.

**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

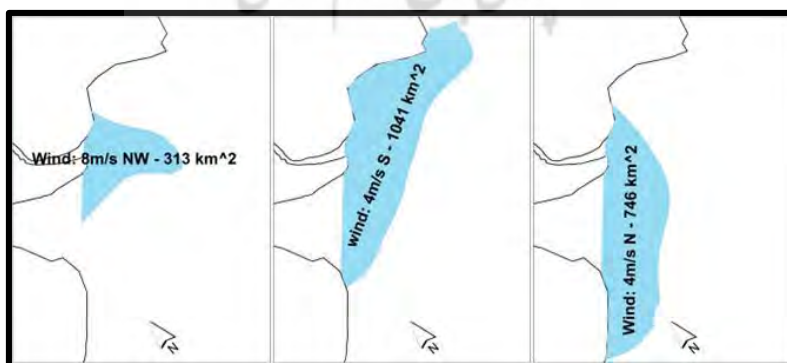
در شکل ۷ جریانات سطحی شمال غرب خلیج فارس و دهانه رودخانه در شرایط بدون نیروی باد ارائه شده است. در این شکل چرخش پادساعت‌گرد خلیج فارس در شمال غرب آن کاملاً مشهود است. از آنجاکه شبکه مدل در دهانه رودخانه دارای قدرت تفکیک مکانی بالا است، به همین دلیل برای نمایش واضح‌تر، نتایج جریانات سطحی مدل بر روی شبکه‌ای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

پادساعت گرد 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 رودخانهی اروند 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 مترمکعب 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، جهت گیری 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 رودخانهی اروند به ازای دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه و سه حالت مختلف باد منطقه  
**Fig (8):** Arvand river plume area and dimensions for three different wind conditions (river discharge 300 m<sup>3</sup>/h)

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج تحقیقات قبلی انجام شده در این منطقه شامل چرخش پادساعت گرد آب (Reynolds, 1993)، لایه بندی 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. علاوه بر این‌ها، نتایج حاکی از لایه بندی 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 پادساعت گرد در شمال غرب 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 گسترده می شود. جهت گیری پلوم با اعمال باد جنوبی به سمت شمال و با اعمال باد شمال غربی به سمت جنوب شرق است. به طور کلی، لایه بندی شدید ستون آب، تأثیرپذیری گسترده 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 ارونند است. علاوه بر شکل و جهت گیری پلوم، ابعاد آن نیز کاملاً به شرایط باد وابسته است. بادهای موازی با ساحل، عمدتاً سبب وسیع تر شدن پلوم می شوند. بادهای شرقی و جنوب شرقی سبب نفوذ شوری آب دریا به رودخانه شده و شوری دهانه رودخانه را افزایش می دهند.

پلوم رودخانه و جبهه یا مرز آن، محدوده‌ای با گرادیان شدید پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است. محققان زیادی ارتباط بین جبهه‌ها و تجمع ماهی‌ها به ویژه ماهی‌های مهاجر را نشان دادند (Podesta et al., 1993). این موضوع نشان دهنده اهمیت شناخت نوع پلوم رودخانه‌ها و رفتار آن‌ها از منظر شیلاتی و صیادی است. با توجه به پلوم سطحی رودخانه‌ای ارونند، می توان جهت گیری پلوم این رودخانه را بر اساس شرایط باد پیش بینی و جهت بهره‌وری شیلاتی بکار گرفت. علاوه بر این، پیش بینی جهت گیری و گسترده پلوم رودخانه ارونند از نظر زیست شناسی، آلودگی، رسوب گذاری 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 ارونند تعریف شد که خود سبب تحمیل هزینه‌های محاسباتی می شود. بنابراین انجام اندازه گیری‌های میدانی در دهانه رودخانه ارونند، جهت تدقیق مدل‌های عددی پیشنهاد می گردد. همچنین اجرای مدل‌های عددی لاگرانژی مخصوص رودخانه و مقایسه نتایج، در شناخت بیشتر این محیط بسیار کارآمد خواهد بود.

#### ۵- سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی سازمان بنادر و دریانوردی در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

## 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., & Fayaz Mohammadi, 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 .
- Fayaz Mohammadi, 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, & Tsihrintzis. (2015). Nestos River plume dynamics under variable physical forcing. *Πανελλήνια και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών*, 549-566 .
- Kämpf, J., & Sadri nasab, 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., & Sakhai, 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 .
- Osadchiv, 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*, 34, 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.