



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



شبیه سازی پلوم رودخانه اروند و بررسی اثر باد و دبی رودخانه بر ساختار آن با استفاده از مدل اقیانوسی

هیدرودینامیکی سه بعدی FVCOM

مسعود صدیقی نسب^۱، عباس عینعلی^{۲*}، محمد اکبری نسب^۳، محمدعلی نجارپور^۲

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

۳. گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی اقیانوسی، دانشگاه مازندران، بابل، ایران.

* نویسنده مسؤل، پست الکترونیک: abbaseinaly@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/JMST.2019.122183.2135](https://doi.org/10.22113/JMST.2019.122183.2135)

چکیده

پلوم رودخانه اروند که اصلی ترین منبع آب شیرین برای خلیج فارس بوده، حوضه آبریز آن سکونت گاه حدود ۵۴ میلیون نفر انسان در منطقه است، از پدیده های مهم در مناطق ساحلی است. رودخانه اروند، مرز دو کشور ایران و عراق بوده، پلوم آن در خلیج فارس در قلمرو سه کشور ایران، عراق و کویت شکل می گیرد. این موضوع به همراه مشکلات سیاسی و امنیتی منطقه و همچنین کم عمق بودن دهانه رودخانه، علت کمبود اندازه گیری های میدانی در منطقه و ناشناخته ماندن دبی رودخانه اروند است. با وجود مشکلات ناشی از کمبود داده های میدانی، این مطالعه از جدی ترین تلاش ها برای درک ساختار پلوم این رودخانه مهم است. در این تحقیق، چرخش آب و دما و شوری خلیج فارس، با استفاده از مدل FVCOM مدل سازی شد. سپس حساسیت ساختار سطحی پلوم رودخانه اروند نسبت به تغییرات دبی و باد مورد بررسی دقیق تر قرار گرفت. به این منظور ۱۴ حالت مختلف باد به علاوه ۸ حالت مختلف دبی به مدل اعمال شد. نتایج نشان داده که پلوم رودخانه اروند از نوع «پلوم گسترده در سطح» است و حساسیت بالایی نسبت به تغییرات باد دارد. افزایش سرعت باد، عموماً سبب کاهش مساحت پلوم شد. حالت های مختلف باد سبب ایجاد سه نوع پلوم در دهانه این رودخانه شد. در نوع اول پلوم به سمت سواحل شمال غربی خلیج فارس و در نوع سوم به سمت سواحل کویت منحرف می شود. در نوع دوم پلوم در امتداد مسیر ورود آب رودخانه به دریا حرکت کرده، به طرفین منحرف نمی شود. این جابجایی پلوم صرفاً به دلیل جابجایی توده آب سطحی است.

واژگان کلیدی: اروندرود، پلوم رودخانه، دبی، FVCOM.

۱. مقدمه

اقیانوسی جهان است. خلیج فارس به واسطه تنگه هرمز که تنها ۵۶ کیلومتر عرض دارد و در باریک‌ترین قسمت خلیج است، به خلیج عمان و قسمت‌های شمال‌غربی اقیانوس هند متصل می‌شود (Azizpour et al., 2014). خلیج فارس ۹۹۰ کیلومتر طول، بیشینه و متوسط عمق به ترتیب ۳۶ و ۱۲۰ متر و مساحت ۲۳۹۰۰۰ کیلومتر مربع، به دلیل آب و هوای گرم و خشک و تبخیر بالا یکی از دریا‌های شور به حساب می‌آید (Emery, 1956).

ارزیابی‌های انجام شده از دبی رودخانه اروند بسیار محدود و در عین حال متفاوت هستند. اما نکته‌ای که در اینجا اهمیت دارد آنکه اولاً این ارزیابی‌ها هیچ‌گاه از اندازه‌گیری‌های دقیق و مداوم حاصل نشده و ثانیاً دبی این رودخانه به دلیل فقدان داده‌های میدانی به ویژه بعد از ساختن سد‌هایی در بالا دست که سبب کاهش شدید دبی این رودخانه شده‌اند، نامشخص است (Kämpf and Sadrinab, 2006). تحقیقی که در آن با استفاده از روش‌های میدانی و عددی انتقال رسوب در رودخانه اروند بررسی شد نشان داد که ستون آب رودخانه در نزدیکی دهانه آن، لایه‌بندی شده است (Abdullah et al., 2016; Fayazmohammadi, 2017).

منابع محلی ایجاد کننده شناوری در امتداد سواحل، از عوامل اصلی اثرگذار بر جریانات ساحلی و جریانات فلات قاره است. این جریانات شناور (کم‌چگال) معمولاً به دلیل دبی رودخانه و یا تبادل بین دو حوضه آبی مجزا با چگالی آب متفاوت شکل می‌گیرند. با برخورد جریان شناور با آب چگال فلات قاره، غالباً پلومی شکل می‌گیرد که مرز بین این پلوم و آب چگال فلات قاره با گرادیان شدید چگالی (جبهه چگالی) مشخص می‌شود. ساختار این پلوم ممکن است به اشکال مختلفی باشد که به جریانات محیطی، توپوگرافی بستر، ویژگی‌های آب ورودی و باد بستگی دارد (Yankovsky and Chapman, 1997).

پلوم رودخانه‌ای (River Plume) از مهم‌ترین پدیده‌ها در مناطق ساحلی است. در مناطقی که دبی رودخانه قابل

رودخانه اروند از پیوستن چهار رودخانه مهم کارون، کرخه (در ایران)، دجله (Tigris) در ترکیه و عراق و فرات (Euphrates) در عراق به یکدیگر شکل می‌گیرد؛ بنابراین حوضه آبریز این رودخانه عمده‌تاً بین دو کشور ایران و عراق مشترک است. اروند رود اصلی‌ترین منبع آب شیرین برای خلیج فارس است و نقش زیست محیطی بسیار مهمی در مناطق ساحلی شمال غرب خلیج فارس دارد. این رودخانه، بزرگترین منبع آب سطحی در این منطقه است که حوضه آبریز آن با بیش از ۹۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع، از کوه‌های زاگرس در ایران و کوه‌های تاروس (Taurus) در ترکیه تا سرزمین‌های پست باتلاقی نزدیک خلیج فارس را شامل می‌شود. حوضه این رودخانه، سکونت‌گاه حدود ۵۴ میلیون نفر انسان در کشورهای ایران، عراق، سوریه و ترکیه است. اروند رود با نزدیک شدن به خلیج فارس، عریض‌تر می‌شود؛ به طوری که عرض آن از ۷۰۰ متر در نزدیکی خرمشهر به حدود ۸۰۰ متر در دهانه رودخانه افزایش می‌یابد. در تقسیم‌بندی دلتای رودخانه‌ها، از دلتای رودخانه اروند با عنوان Estuarine-deltaic یاد می‌شود؛ زیرا رسوبات این رودخانه در مناطق باریک و کم‌عمقی از خلیج فارس ته‌نشین می‌شود. دلتای این رودخانه عرضی در حدود ۱۴۰ کیلومتر دارد که به بیش از ۱۰ شاخه تقسیم می‌شود (UN-ESCWA, 2013). با توجه به شرایط اکولوژیکی حاکم بر رودخانه اروند، تغییرات شوری، کدورت بالا و جریانات جزر و مدی تاثیر به‌سزایی بر فاکتورهای زیستی این رودخانه دارد (Nozarpour et al., 2018). بنادر خرمشهر و آبادان که در حاشیه رودخانه اروند قرار گرفته‌اند، از فعال‌ترین بنادر کشور قبل از جنگ تحمیلی بودند که هنوز نیز سهم قابل توجهی در چرخه اقتصادی کشور دارد (Abdolkhanian et al., 2018).

خلیج فارس به‌عنوان یک حوضه کم‌عمق نیمه بسته به دلیل ذخائر فراوان نفت و گاز، تکه‌ای بسیار مهم از آب‌های

کیلومتر از دهانه رودخانه گسترش می‌یابد. البته پلوم شناوری ممکن است حالتی بین پلوم گسترده در سطح و پلوم گسترده در بستر داشته باشد. این پلوم‌های میانی زمانی اتفاق می‌افتد که جریان شناور که به سمت دور از ساحل گسترش می‌یابد تا فاصله‌ای با بستر در تماس بوده و بعد از آن از بستر جدا شده و به سمت دریا گسترش می‌یابد؛ درحالی‌که جبهه بین پلوم و آب‌های محیطی به-تدریج به سطح نزدیک می‌شوند.

دینامیک پلوم گسترده در سطح توجه بیشتری را نسبت به پلوم گسترده در بستر در بین محققان به خود جلب کرده است. بسیاری از محققین نشان دادند که جریان شناور سطحی تمایل به گسترش شعاعی دارد که در نیمکره شمالی به علت نیروی کوریولیس و یا جریانات محیطی موازی با ساحل، در راستای حرکت خود به سمت راست منحرف می‌شود. پلوم گسترده در سطح در درون خود چرخشی آنتی‌سیکلونی (anticyclonic circulation) دارد. این نوع پلوم معمولاً به سمت دور از ساحل به صورت یک تحذب یا پیشرفتگی گسترش می‌یابد که یک سر آن به دهانه خور یا رودخانه متصل است و یک جریان آنتی‌سیکلونیک در درون آن قرار دارد.

این دو نوع پلوم علی‌رغم اینکه در مواردی مانند تفاوت چگالی بین پلوم و جریانات محیطی (تقریباً ۱ کیلوگرم در متر مکعب) و اثرپذیری از نیروی کوریولیس شبیه هم هستند، اما تفاوت‌های بسیاری در مقیاس مکانی و ویژگی-های جریانات و دینامیک خود دارند (Yankovsky and Chapman, 1997). ساختار و حرکت پلوم گسترده در سطح به عواملی دیگر مانند باد و جریانات کشندی وابسته است. باد می‌تواند اثرات شدیدی بر شکل و گستردگی این نوع از پلوم‌ها داشته باشد و اگر باد متغیر باشد، پلوم می-تواند بسیار متغیر باشد (Tarya et al., 2015). در واقع گستردگی این نوع از پلوم‌ها متأثر از جهت باد است، درحالی‌که اندازه آن اساساً به واسطه اندازه دبی رودخانه تعیین می‌شود (Kamidis et al., 2015).

توجه است، پلوم رودخانه به‌طور آشکاری بر دینامیک ساحل و مواد رودزاد (River-born): موادی که از رودخانه منشا می‌گیرند) مانند رسوبات، مواد مغذی و آلودگی‌ها تاثیرگذار است (Garvine, 1995). پلوم رودخانه‌ای از جمله فرایندهای است که طبیعت آن بسیار متغیر است. آب رودخانه‌ای وارد شده به سواحل دریاها نشان دهنده ارتباط بسیار مهمی بین سیستم دریا و خشکی است (Gonçalves et al., 2012). پلوم‌ها به‌عنوان یک محیط میانی عمل می‌کنند که می‌توانند ویژگی‌های آب رودخانه را تا مسافت طولانی از دهانه رودخانه وارد دریا کند (Kamidis et al., 2015).

ساختار پلوم به دو دسته تقسیم می‌شود. در نوع اول جبهه بین آب‌های ساحلی و پلوم، از سطح تا بستر است. به عبارت دیگر جبهه چگالی که مرز پلوم به حساب می‌آید از سطح تا بستر گستردگی دارد. به این نوع از پلوم، پلوم گسترده در بستر (bottom-advected plume) گفته می-شود زیرا رفتار پلوم اساساً توسط فرارفت در لایه مرزی کف (advection in the bottom boundary layer) کنترل می‌شود. جریانات در فلات قاره Labrador می‌تواند به‌عنوان مثالی از پلوم گسترده در بستر در نظر گرفته شود. در این نوع از پلوم‌ها مقاطع عرضی چگالی و شوری در راستای عمود بر ساحل نشان می‌دهد که جریان شناور در کل منطقه فلات قاره گسترده شده و مرز پلوم (جبهه شوری یا چگالی) در نزدیکی shelf break قرار می‌گیرد. در نوع دوم، جریان شناور به‌عنوان لایه‌ای نازک روی آب‌های فلات قاره قرار گرفته و آب‌های محیطی که چگال‌تر هستند در زیر آن قرار می‌گیرند. این پلوم ممکن است تا فاصله زیادی از ساحل گسترده شده و کمترین تماس را با بستر-شاید بجز در مناطق خیلی نزدیک با ساحل- دارد. به این نوع پلوم، پلوم گسترده در سطح (surface-advected plume) گفته می‌شود. ورود آب رودخانه نیاگارا به دریاچه اونتاریو (Ontario) مثالی از این نوع پلوم است که در آن ضخامت لایه شناور تنها ۱۰ متر است و تا فاصله ۱۰ تا ۱۵

محاسبات شار روی یک مش مثلثی سایز دلخواه (شبهه روش المان محدود) حل می‌شوند، روش حجم محدود بهتر شرط پایستگی جرم در حوزه‌ی محاسباتی را ارضا می‌کند. از دید تکنیکی و تخصصی FVCOM شامل بهترین خواص روش‌های تفاضل متناهی (از نظر سادگی گسسته‌سازی کدها و مفید بودن محاسباتی) و المان متناهی (مناسب بودن هندسه محیط) است. معادلات اساسی مدل شامل معادلات تکانه، پیوستگی، دما، شوری و چگالی است (Chen et al., 2006).

در مدل FVCOM، کاربر دو انتخاب برای ضرایب پخش افقی دارد؛ یکی انتخاب مقدار ثابت و دیگری انتخاب روش پارامتری اسماغورینسکی. در این روش، پخش افقی برای اندازه حرکت چنین است:

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

به طوری که C پارامتر ثابت است و Ω^u مساحت (المان‌های کنترل اندازه حرکت)، A_m به گرادیان سرعت و مساحت المان (تفکیک مدل) بستگی دارد (با کاهش اندازه یا کاهش گرادیان سرعت افقی کاهش می‌یابد).

یک فرمول مشابه هم برای کمیت‌های اسکالر وجود دارد که متناسب با ناحیه المان کنترل و گرادیان افقی غلظت مورد تحقیق است که برای مثال برای دمای آب (T)، چنین خواهد بود:

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

در حالی که ناحیه Ω^ξ و P_r عدد پراانتل است (Smagorinsky, 1963).

ویژگی بارز FVCOM انتخاب گسترده‌ی مدل‌های تلاطم اقیانوسی است که به منظور پارامتر بندی ضرائب لزجت پیچکی قائم و انتشار گرمایی قائم استفاده می‌شود. مدل تلاطمی MY2.5 محبوب‌ترین مدل q - q1 است. جایی که q انرژی جنبشی تلاطمی است و I تلاطم بزرگ مقیاس

درک اهمیت پلوم رودخانه در دهه‌های اخیر بسیاری از دانشمندان را بر آن داشت تا جهت درک دینامیک پلوم با استفاده از مدل‌های ریاضی تلاش کنند. چائو و بیوکورت اولین کسانی هستند که در سال ۱۹۸۶ ساختار پلوم و جریانات موازی با ساحل ایجاد شده توسط آن را با مدل - سازی عددی مطالعه کرد (Chao and Boicourt, 1986). Davies و Xing در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که تنش برشی باد (wind shear stress) سبب افزایش اختلاط عمودی شده و بنابراین بر ساختار عمودی و افقی پلوم اثرگذار است (Xing and Davies, 1999). اثر نیروی کوریولیس در سال ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲ توسط Garvine بررسی شد درحالی‌که تغییرات رفتار پلوم به علت مورفولوژی ساحل توسط Wiseman و Garvine در سال ۱۹۹۵ مطالعه شد. اهمیت کشند توسط Chao در سال ۱۹۸۸ و Kourafalou و همکاران در سال ۱۹۹۶ مطرح شد. کشند سبب افزایش اختلاط عمودی در پلوم و تاخیر در گسترش افقی آن می‌شود (Kamidis et al., 2015). در مطالعه Kamidis و همکاران در سال ۲۰۱۵، مدل‌های ریاضی اثر نیروهای خارجی اثرگذار بر سرعت شکل‌گیری، اندازه و شکل پلوم رودخانه نستوس بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که کشند اثر خاصی بر ساختار پلوم ندارد (Kamidis et al., 2015). رفتار مشابهی در دیگر مطالعات با اثر کشند بر پلوم مانند مطالعات (Liu et al., 1999; Bricker et al., 2006) گزارش شد.

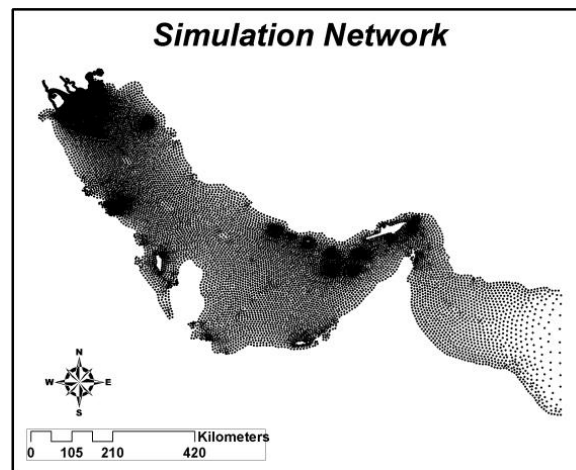
۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق از مدل سه‌بعدی حجم محدود FVCOM استفاده شده است. این مدل سه بعدی دارای شبکه‌ی غیر ساختاریافته، سطح آزاد و معادلات اصلی حاکم بر اقیانوس بوده و همچنین یک مدل حجم متناهی است که بر خلاف مدل‌های المان محدود و تفاضل محدود که از شکل دیفرانسیلی معادلات حاکم استفاده می‌کنند، این مدل از شکل انتگرالی معادلات حاکم استفاده کرده است. از آنجایی که این معادلات انتگرالی به طور عددی، توسط

متر در نزدیکی دهانه رودخانه اروند متغیر است (شکل ۱). طولانی شدن زمان اجرای مدل، دلیل محدود کردن رزولوشن شبکه تا ۲۰۰ متر در دهانه رودخانه است. از دو سری داده‌های عمق‌سنجی، جهت درون‌یابی و اختصاص عمق به نقاط شبکه در این مدل استفاده شد. ابتدا از داده‌های IOC، GEBCO_08 با رزولوشن مکانی ۳۰ ثانیه (، IOC، 2003) در کل محدوده مذکور استفاده شد. سپس برای دقت بیشتر در نزدیکی دهانه رودخانه اروند، از داده‌های سازمان جغرافیایی ارتش (شماره چارت ۱۲۶۹/۱) با رزولوشن مکانی ۳۰ متر استفاده شد.

است (Mellor and Yamada, 1982). یکی از مشخصه‌های بارز FVCOM استفاده از نسخه به روز مدل MY-2.5 است.

منطقه شبهه‌سازی شامل حوضه آبی خلیج فارس و قسمت‌هایی از دریای عمان است. محدوده جغرافیایی این شبهه‌سازی از ۲۲/۵۳ تا ۳۰/۴۹ عرض جغرافیایی شمالی و ۴۷/۷۸ تا ۵۹/۸۱ طول جغرافیایی شرقی قرار دارد. برای تولید شبکه محاسباتی با رزولوشن مکانی متغیر از نرم‌افزار تخصصی (SMS 10.1, 2010) استفاده شد. فاصله بین نقاط شبکه از بیشینه‌ی حدود ۳۲ کیلومتر در مرز باز (مرز باز در طول جغرافیایی ۵۹/۸۱ قرار دارد) تا حدود ۲۰۰



شکل ۱: شبکه محاسباتی استفاده شده در مدل

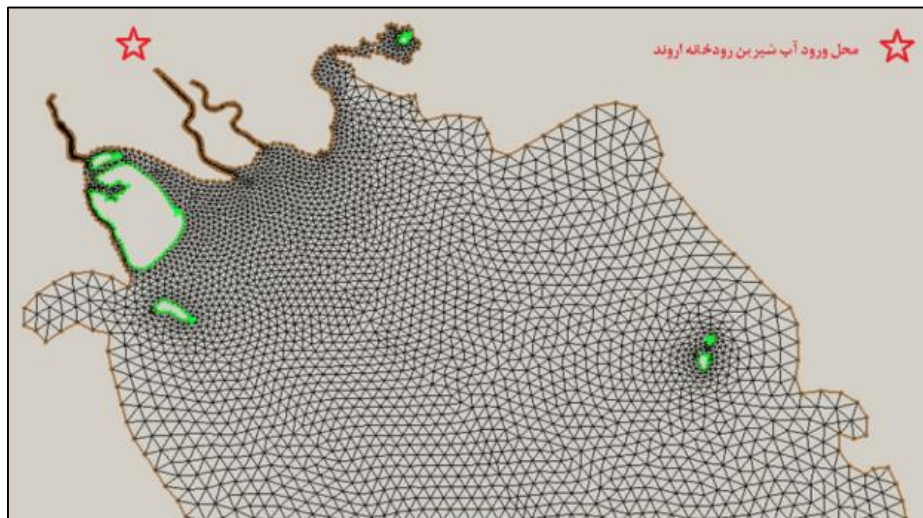
را پوشش می‌دهد، اعمال شده است. این اطلاعات از مدل Tidal Model Driver (TMD) استخراج شده است (Padman and Erofeeva, 2005). داده‌های باد، بارش، تبخیر و شار گرمایی از داده‌های پایگاه ECMWF (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data>) استفاده شد. این اطلاعات ۶ ساعته بوده و دارای دقت مکانی ۰/۲۵ درجه است که روی شبکه محاسباتی مدل، درون‌یابی شد. در واقع داده‌های هواشناسی استفاده شده در این مرحله از مدل‌سازی، در مکان و زمان متغییر هستند. داده‌های نیم‌رخ دما و شوری در مرز باز از خروجی مدل HYCOM

گام زمانی مد خارجی (External Mode) از روش پایداری CFL (Courant-Friedrich Levy) به این شکل محاسبه می‌شود: $\Delta t_E \leq \frac{\Delta L}{\sqrt{gD}}$ ، که در آن ΔL کوچکترین طول المان در شبکه، D عمق متناظر با المان و g نیروی گرانش است. برای عملکرد بهتر، گام زمانی مد داخلی (Internal Mode) بزرگتر از گام زمانی مد خارجی و ۱۰ برابر آن انتخاب می‌شود (Chen et al., 2006). بر این اساس گام زمانی مد داخلی و مد خارجی به ترتیب برابر ۳۰ و ۳ ثانیه انتخاب شد. نوسانات سطح آب در نقاط مرز باز، به صورت دامنه و فاز که مؤلفه جزر ومدی شامل (M2, S2, K1،)

اخیر و احداث سدهای متعدد بر روی سرشاخه‌های آن کاهش چشمگیری یافته است. طبق این تحقیق کمترین و بیشترین میزان دبی به ترتیب متعلق به ماه‌های اکتبر و آوریل است و میانگین سالانه آن ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه است. شوری آب در محل ورود آب شیرین طبق اندازه‌گیری برابر با ۲ ppt در نظر گرفته شد (Fayazmohammadi, 2017). دمای آب رودخانه اروند تغییرات مکانی چشمگیری ندارد. اندازه گیری نشان داد که دمای آب رودخانه در موقعیت (۳۰/۴۵۸۳ شمالی و ۴۷/۹۸۶۰ شرقی) در طول سال بین ۱۱ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (Lazem, 2014). با توجه به اینکه این موقعیت نسبت به محل ورود آب شیرین به مدل به دهانه رودخانه و شرایط دریا نزدیک‌تر است و همچنین این واقعیت که تغییرات مکانی دمای آب در این رودخانه چشمگیر نیست، آب رودخانه بر اساس مطالعه (Kampf and Sadrinasab, 2006) با دمایی بین ۱۲ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد به مدل اعمال شد.

(http://hycom.org) و در عمق‌های استاندارد استفاده شده است. نتایج این مدل‌ها پس از بررسی و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری و ماهواره، دارای دقت خوبی به ویژه در مناطق عمیق دریا‌های آزاد است. همانطور که در شکل شماره ۲ نشان داده شده محل ورود آب شیرین به مدل، نقطه تلاقی رودخانه‌های کارون و شط‌العرب است که در واقع همان ابتدای اروندرود است. قبلاً نیز اشاره شد که تا کنون ارزیابی صحیحی از دبی رودخانه اروند صورت نگرفته است.

در این مدل، برای دبی رودخانه اروند همانند تحقیق (Kampf and Sadrinasab, 2006) مقدار ۳۵۰ تا ۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه که به صورت سینوسی طی سال تغییر می‌کند؛ در نظر گرفته شد. دبی در نظر گرفته شده کمتر از ارزیابی‌های قبلی (Wright, 1974; Saad, 1978; Reynolds, 1993; Johns et al., 2003) در این زمینه است، زیرا دبی این رودخانه در پی خشکسالی سال‌های



شکل ۲: شبکه محاسباتی مدل در قسمت‌های شمال غربی خلیج فارس و محل ورود آب شیرین به خلیج فارس

حوضه به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. همچنین در زمان آغازین اجرای مدل در تمام نقاط شبکه اطلاعات

از آنجا که اجرای مدل از ابتدای سال میلادی است، دما و شوری به ترتیب ۱۸ درجه سانتی‌گراد و ۳۵ ppt در کل

و شمال غربی، بادهای ۱۲ متر بر ثانیه شمال غربی و جنوب-شرق-جنوب، باد ۱۴ متر بر ثانیه شمال غربی و شرایط بدون باد.

برای بررسی اثر تغییرات دبی، در هر حالت باد، ۸ حالت مختلف برای دبی رودخانه نیز انتخاب شد. دبی‌های انتخاب شده برای انجام این آزمایشات به صورت ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰ و ۶۵۰ مترمکعب بر ثانیه انتخاب شد که تا حد امکان کمترین و بیشترین مقدار قابل تصور برای آن را پوشش دهد. بنابراین مجموعاً ۱۱۲ حالت مختلف شرایط باد-دبی آزمایش شد. در مدل FVCOM قابلیت اعمال دبی بصورت درصدی در لایه‌های مختلف ستون آب وجود دارد. این موضوع در رودخانه‌های جزر و مدی و لایه‌بندی مانند اروند رود بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل در این تحقیق نیز از این قابلیت مدل استفاده شد و حدود ۸۰ درصد دبی رودخانه در لایه سطحی و مابقی آن در لایه‌های زیرین (به صورت کاهش) به مدل اعمال شد.

دبی رودخانه اروند در فصل بهار به بیشترین حد خود می‌رسد. به همین دلیل تشخیص پلوم رودخانه و بررسی اثر باد بر پلوم آن راحت‌تر و دقیق‌تر صورت می‌گیرد. همچنین در این حالت به دلیل گسترده شدن پلوم و پیشروی بیشتر آن در دریا نسبت به دیگر زمان‌های سال، اثر جزر و مد بر پلوم نیز کمتر می‌شود. با توجه به دلایل فوق، برای مطالعه پلوم رودخانه از خروجی‌های مدل در ماه مارس استفاده شده است. به عبارتی در ماه مارس ۱۴ حالت وزش باد در منطقه، به مدل اعمال شد و به ازای هر یک از این شرایط باد نیز، دبی رودخانه از کمترین تا بیشترین مقدار قابل تصور آن در نظر گرفته شد. اما همه این ۱۱۲ حالت در شرایط آب و هوایی (دمای هوا، رطوبت هوا، تابش خورشید و ...) ماه مارس به مدل اعمال شد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، علاوه بر دبی رودخانه، شرایط باد (به‌عنوان پارامترهای قابل کنترل) و جزر و مد، جریان‌ات محیطی (به‌عنوان پارامتر پس‌زمینه) نیز از عوامل مؤثر بر ساختار

تراز سطح آب از خروجی مدل TMD قرار داده شد و سرعت جریان صفر در نظر گرفته شد.

مدل در مد کژفشاری (Baroclinic) و در ۲۰ لایه در مختصات سیگما اجرا شده است. یکی از ویژگی‌های بارز مدل FVCOM تنظیم لایه‌ها در فواصل نامساوی است. در این مدل، ضخامت لایه‌های سطحی کمتر از لایه‌های زیرین است و با توجه به تغییرات کم عمق در این محدوده، ضخامت لایه سطحی تغییرات چندانی در دهانه رودخانه ندارد.

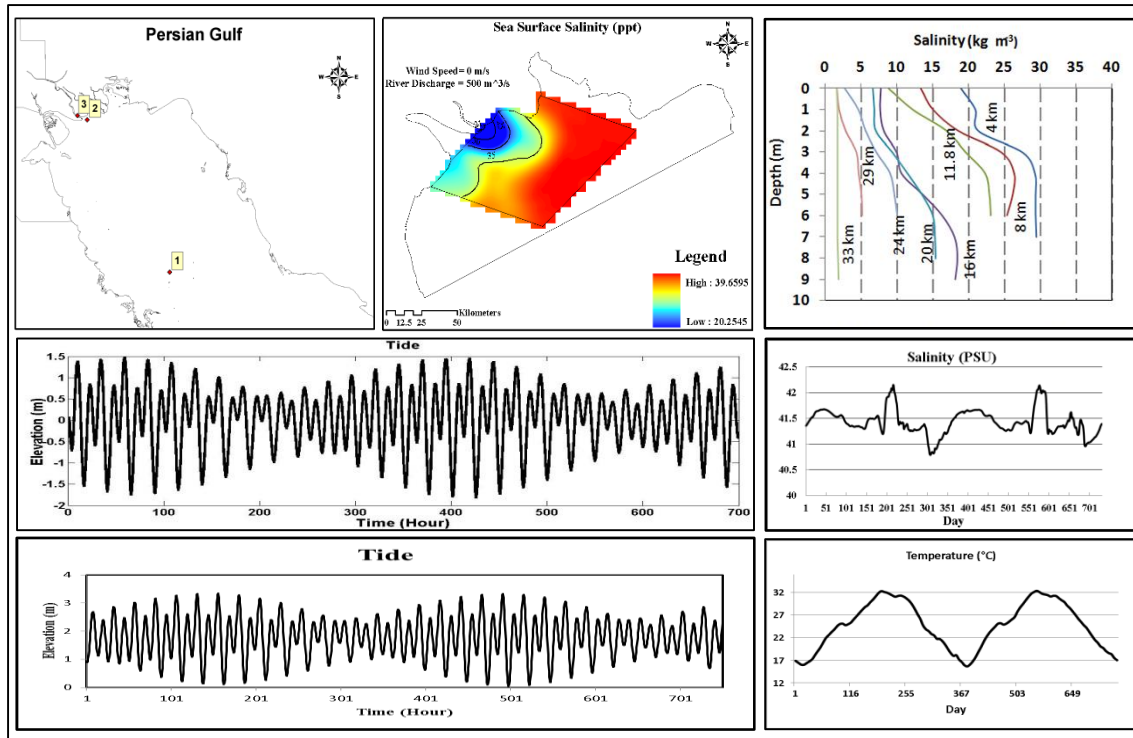
اختلاط عمودی مدل با استفاده از روش MY2.5 و اختلاط افقی با روش اسماکورینسکی انجام شد. مدل ابتدا سکون آزمایشی شد (اجرای مدل بدون هیچ نیرویی) و ناپایداری‌های ناشی از شبکه و عمق‌سنجی رفع شد. در مراحل بعدی مدل با اضافه کردن مولفه‌های جزر و مدی، سرعت‌های شرق‌سو و شمال‌سوی باد، ورودی رودخانه، پارامترهای دما و شوری در گره‌های مرز باز و به صورت سری زمانی و داده-های شار گرمایی اجرا شد. مدل پس از ۱۵ سال اجرا، به پایداری رسید.

هدف از اجرای مرحله دوم مدل‌سازی انجام آزمایشاتی است که اثر دبی و باد را بر ساختار پلوم مشخص می‌کند. بنابراین همه تنظیمات مدل در این آزمایشات بجز شرایط هواشناسی و دبی رودخانه همانند تنظیمات مدل مرحله اول است که قبلاً توضیح داده شد. در بین شرایط هواشناسی نیز تنها شرایط باد در هر آزمایش تغییر پیدا کرد، یعنی بقیه پارامترهای هواشناسی شامل بارش، تبخیر، شار خالص گرمایی سطحی و شار موج کوتاه سطحی، ثابت بودند.

برای بررسی اثر باد بر روی پلوم رودخانه، ۱۴ حالت باد به‌گونه‌ای انتخاب شد تا شرایط باد منطقه را پوشش دهد. به این منظور از نتایج حاصل از تحقیق Komijane و همکاران در سال ۲۰۱۴ استفاده شد. این ۱۴ حالت باد عبارت هستند از: بادهای ۲ و ۴ متر بر ثانیه شمالی، جنوبی، شرقی و غربی، بادهای ۸ متر بر ثانیه جنوب‌شرقی

رادر موقعیت نقطه شماره ۱ (شکل ۳- بالا سمت چپ) ارائه می‌دهد که نشان دهنده پایداری مدل است. نتایج مدل، چرخشی پادساعتگرد در خلیج فارس را نشان داد که توسط محققانی نظیر رینولدز نیز در سال ۱۹۹۳ تایید شد.

پلوم هستند. مرز پلوم نیز با توجه به شوری سطحی آب سنجیده شد. بنابراین مدل باید چرخش عمومی آب خلیج فارس و شوری آب در دهانه رودخانه را به درستی شبیه سازی کند تا نتایج حاصله از آن قابل اطمینان باشد. (شکل ۳- وسط و پائین سمت راست) نمودار تکرار پذیر به ترتیب شوری و دما سطحی در ۲ سال آخر از مدت شبیه سازی



شکل ۳: بالا سمت چپ: قسمتی از محدوده مدل (خلیج فارس) و موقعیت نقاط برای بررسی پایداری مدل (نقطه ۱)، صحت سنجی کشند (نقطه ۲) و نزدیک ترین ایستگاه اندازه گیری شوری در تحقیق (Abdullah et al., 2016) به دهانه رودخانه (نقطه ۳).

بالا وسط: شوری سطحی دهانه رودخانه و پلوم تشکیل شده در حالت بدون باد.

بالا سمت راست: پروفایل شوری در رودخانه اروند در فواصل مختلف از دهانه در ماه مارس (نمودار آبی پر رنگ متعلق به موقعیت شماره ۳ است).

وسط و پائین سمت چپ: جزر و مد به ترتیب حاصل از مدل و داده های آدمیرالتی در موقعیت شماره ۲.

وسط و پائین سمت راست: سری زمانی به ترتیب شوری و دمای سطحی در موقعیت شماره ۱ در ۲ سال آخر از کل مدت شبیه سازی که نشان دهنده پایداری مدل است.

می‌دهد. علاوه بر این انتخاب پلوم ppt ۳۷ با توجه به فاصله نسبتاً زیاد آن از دهانه رودخانه نسبت به پلوم ppt ۳۲، راهکاری برای کاهش اثرات جزر و مدی بر روی نتایج است. با این وجود برای کنار گذاشتن اثر جزر و مدی بر مساحت پلوم، تمام نتایج نیز در حالت آب‌راکد پایین، از مدل استخراج شد. بنابراین خط هم‌بند ppt ۳۷ به‌عنوان مرز پلوم در این تحقیق تعریف شد. همچنین برای قابل مقایسه بودن مساحت پلوم‌ها در حالات مختلف، تنها مساحت قسمت‌هایی از پلوم که در محدوده باکس رودخانه قرار دارد به‌عنوان مساحت پلوم در این تحقیق در نظر گرفته شد. باکس رودخانه در ادامه نشان داده شده است. نتایج نشان داد که باد غربی ۲ متر بر ثانیه و باد شمال‌غربی ۱۴ متر بر ثانیه به‌ترتیب بیشترین و کمترین میانگین مساحت پلوم را دارند.

شکل ۴ نمودارهای مقطع عرضی شوری دهانه رودخانه در حالت دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه و بدون باد را نشان می‌دهد.

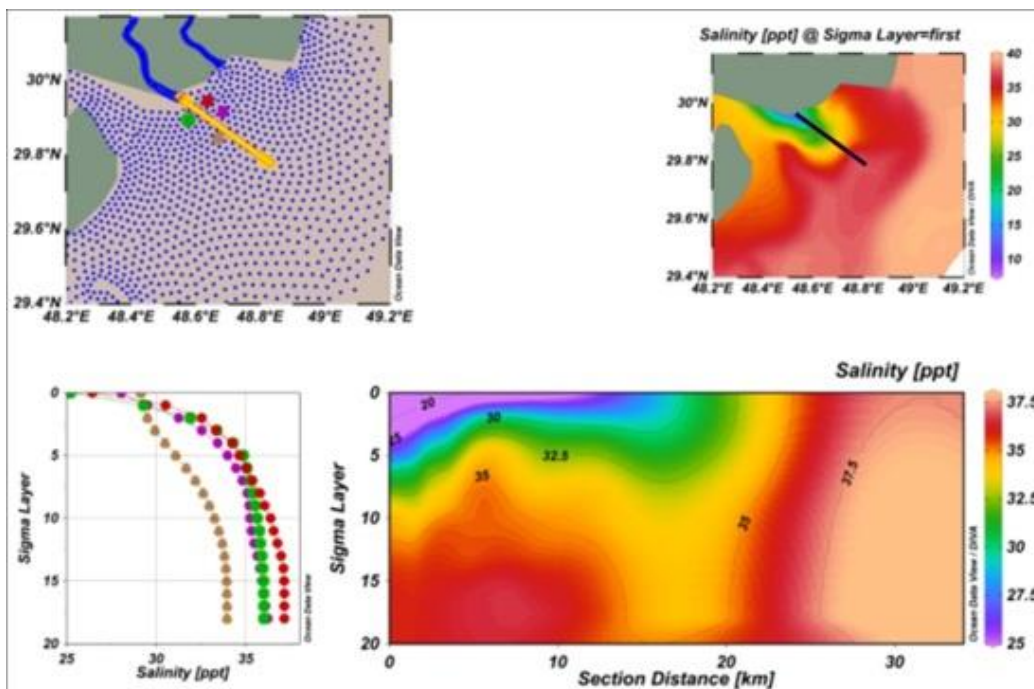
در این تصویر لایه‌بندی آب کاملاً واضح است. آب کم‌شور رودخانه در سطح قرار گرفته و به‌طور کامل از بستر جدا شده است. مقطع عرضی شوری نشان می‌دهد که پلوم شوری ppt ۳۲/۵ تا فاصله ۲۰ کیلومتری از دهانه رودخانه بدون هیچ‌گونه تماسی با بستر گسترده است. در سمت چپ و پائین تصویر نمودار هالوکلاین چند نقطه دلخواه در دهانه رودخانه نیز لایه بندی آب را به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین این نمودارها به‌خوبی نشان می‌دهند که آب شیرین رودخانه پس از ورود به دریا به‌سمت راست خود منحرف می‌شود. به همین دلیل نمودار قهوه-ای شوری کمتری را نشان می‌دهد. بنابراین پلوم رودخانه اروند از نوع پلوم گسترده در سطح است که به‌شدت متأثر از شرایط باد است.

شکل (۳- بالا وسط) شوری سطحی دهانه رودخانه اروند را در حالتی که دبی رودخانه ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه و هیچ‌گونه بادی در منطقه وزیده نمی‌شود در حالت آب-راکد پایین (low water slack) نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در ماه مارس شوری سطحی آب دهانه رودخانه برابر با ppt ۲۰ است که مطابق با نتایج تحقیق (Abdullah et al., 2016) است. شکل ۳-بالا سمت راست، که از نتایج تحقیق (Abdullah et al., 2016) به دست آمده، نشان دهنده شوری آب در فواصل مختلف از دهانه رودخانه در ماه مارس است نزدیک‌ترین ایستگاه به دهانه رودخانه در این مطالعه، در موقعیت نقطه شماره ۳ (شکل ۳- بالا سمت چپ) نشان داده شده است. در شکل ۳-وسط و پائین سمت چپ) جزر و مد به‌ترتیب حاصل از نتایج مدل و داده‌های آدمیرالتی (Admiralty: <https://www.admiralty.co.uk>) در دهانه رودخانه (موقعیت نقطه شماره ۲ در شکل ۳- بالا سمت چپ) ارائه شده است.

۳. نتایج و بحث

معمولاً خط هم‌بند شوری با مقداری که البته برای هر منطقه متفاوت است (مثلاً ۳۰ یا ۳۲ PSU) به‌عنوان مرز پلوم تعریف می‌شود (Wang et al., 2008; Ou et al., 2007). اما نتایج این تحقیق نشان داد که بادهایی با جهت‌های ویژه مانند باد جنوب‌شرقی، با راندن آب دریا به درون رودخانه و بادهای شمال‌غربی شدید با ایجاد اختلاط سبب می‌شوند تا پلومی با مرز شوری ppt ۳۲ مشهود نباشد.

اطلاعات آماری مساحت پلوم‌ها با مرز شوری ppt ۳۳ تا ppt ۳۷ نشان می‌دهد که انحراف معیار و واریانس مساحت پلوم ppt ۳۷ از دیگر پلوم‌ها بیشتر است. این بدین معنی است که پلوم ppt ۳۷ اثر تغییرات دبی و باد را بهتر نشان



شکل ۴. شوری سطحی در حالت دبی ۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه و بدون وزش باد و در حالت آب‌راکد پایین.

بالا سمت راست: شوری سطحی که ورود آب رودخانه با شوری نزدیک به دریا ۲۰ ppt (رنگ آبی) را نشان می‌دهد.
پائین سمت راست: مقطع عرضی شوری و پائین سمت چپ: پروفایل قائم شوری در چند نقطه در دهانه رودخانه
بالا سمت چپ: محل انتخاب مقطع عرضی و نقاط جهت رسم پروفایل قائم

مساحت پلوم رودخانه تنها در یک حالت باد (۴ متر بر ثانیه جنوبی) در شکل ۶ ارائه شده است. در این شکل باکس رودخانه نشان داده شده است. باکس رودخانه محدوده‌ای فرضی است که ساختار پلوم رودخانه تنها در آن محدوده بررسی می‌شود. با این راهکار قسمت‌هایی از پلوم که نزدیک و تحت تاثیر خط ساحلی است از مطالعه حذف شده و به این ترتیب اثرات خط ساحل بر پلوم رودخانه کمتر می‌شود.

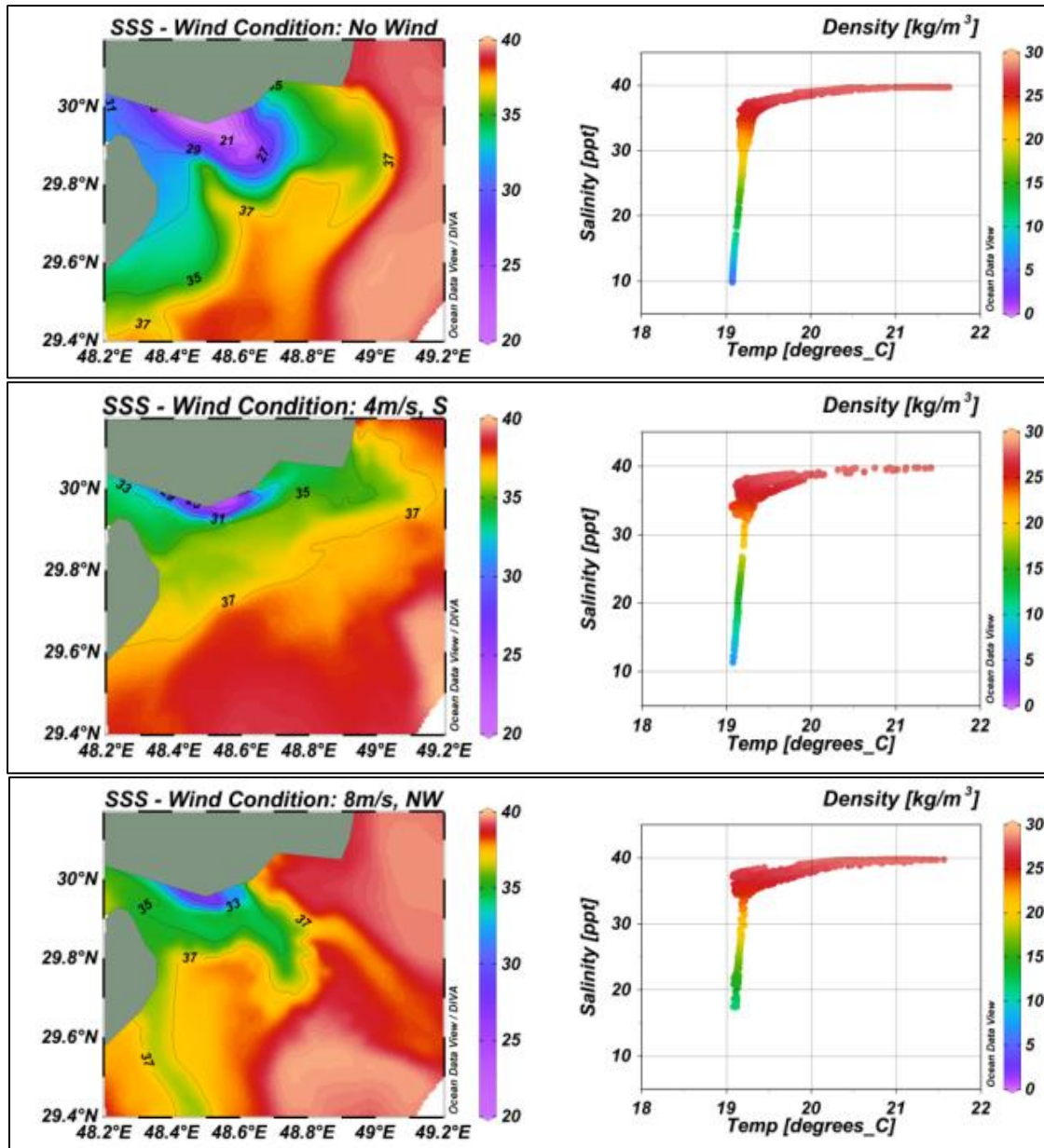
با اعمال شرایط مختلف باد، در همه دبی‌ها سه نوع پلوم حاصل شد که به پلوم نوع ۱ تا ۳ دسته بندی شد. پلوم نوع ۱ به سمت چپ (خور موسی) و نوع ۳ به سمت راست (سواحل کویت) منحرف می‌شود. پلوم نوع ۲ تقریباً مستقیم بوده و به طرفین منحرف نمی‌شود. پلوم نوع ۱

شکل‌های ۵، شوری سطحی دهانه رودخانه در حالت دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه و شرایط باد متفاوت نشان می‌دهند. همچنین نمودارهای پراکنش دما-شوری از همان لایه سطحی نیز در سمت راست شوری سطحی نمایش داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهند که شکل پلوم که در حالت‌های مختلف باد کاملاً متفاوت و تنها به علت جابجایی توده آب سطحی است؛ زیرا نمودار پراکنش دما-شوری در هر سه حالت بسیار به هم شبیه هستند. همه این مطالب نشان‌دهنده لایه‌بندی شدید آب در دهانه رودخانه دارد که سبب ایجاد پلوم گسترده در سطح شده و تاثیر شدید باد ساختار پلوم را روشن می‌کند.

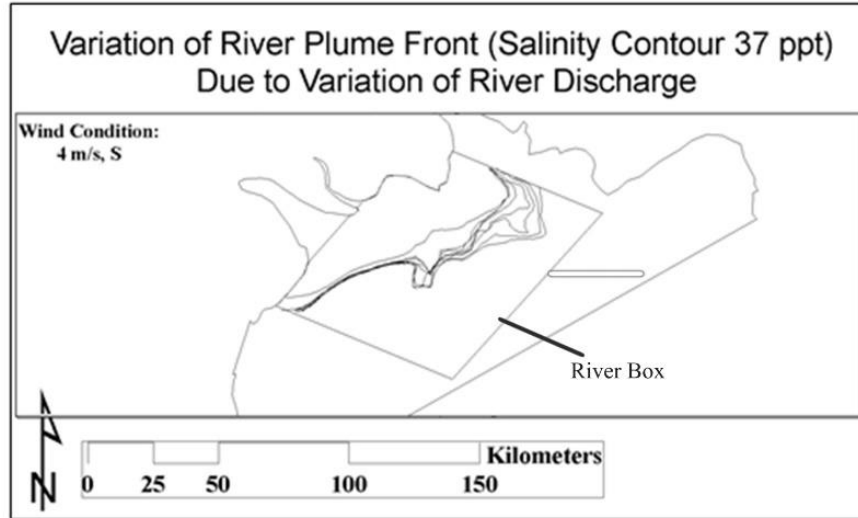
با افزایش دبی رودخانه، مساحت پلوم آن نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که این موضوع امری بدیهی است، تغییرات

شمال غربی و نوع ۳ عمدتاً با بادهای ضعیف تشکیل می-شود.

عمدتاً با بادهای جنوبی تا جنوب شرقی و باد ضعیف شرقی (۲ متر بر ثانیه شرقی)، نوع ۲ با بادهای غربی تا



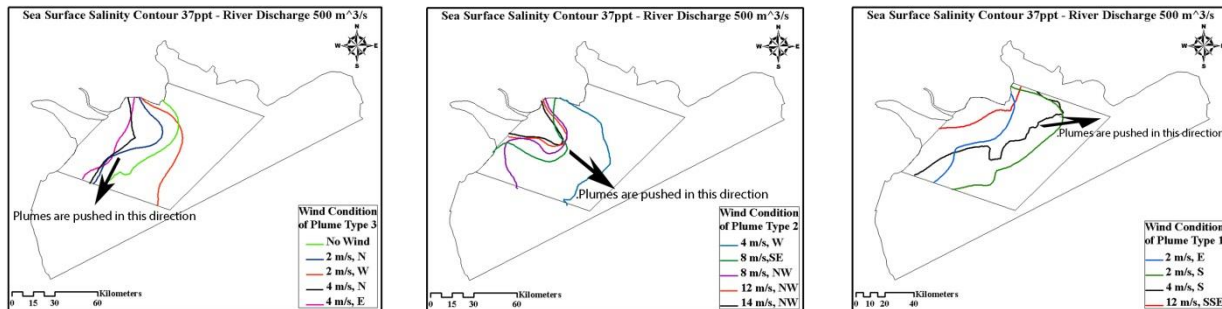
شکل ۵: شوری سطحی در حالت‌های از بالا به پائین به ترتیب بدون باد، باد ۴ متر بر ثانیه جنوبی و ۸ متر بر ثانیه شمال غربی. در سمت راست نمودار پراکندگی دما-شوری متناظر برای هر حالت ترسیم شده است.



شکل ۶: خط همبند شوری ۳۷ ppt به عنوان مرز پلوم به ازای دبی‌های متفاوت (از ۳۰۰ تا ۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه

به درون این خور نفوذ کرده و به این ترتیب از گستردگی بیشتر آن به سمت سواحل غربی رودخانه جلوگیری می‌کند) سبب تشکیل پلوم به شکلی می‌شود که در نوع ۱ قرار می‌گیرد. اما باد شرقی قوی تر ۴ متر بر ثانیه سبب تشکیل پلوم نوع ۳ می‌شود.

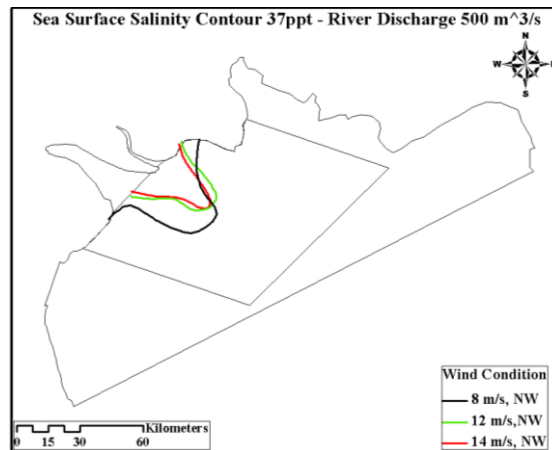
شکل‌های ۷ این سه نوع پلوم و جهت انتشار آنها را نشان می‌دهند. باد ضعیف شرقی ۲ متر بر ثانیه با توجه به نیروی کم آن فقط سبب حرکت مختصر پلوم به سمت سواحل اطراف دهانه شده و مورفولوژی خاص این منطقه (قرارگیری خور عبدالله در کنار دهانه رودخانه سبب می‌شود که پلوم با حرکت غرب‌سوی خود بر اثر باد شرقی



شکل ۷: مرز پلوم (شوری ۳۷ ppt) در دبی $500 \text{ m}^3/\text{s}$ و حالت‌های مختلف باد که سبب تشکیل پلوم نوع ۱ (سمت راست) پلوم نوع ۲ (وسط) و پلوم نوع ۳ (سمت چپ) ثانیه

باد عامل افزایش تنش برشی در سطح دریا است و به همین دلیل افزایش سرعت باد سبب اختلاط بیشتر در ستون آب شده و در صورت چشم‌پوشی از سایر عوامل (مانند مورفولوژی ساحل، زاویه بین جهت باد و جهت جریان سطحی، بتی متری بستر و غیره)، به خودی خود مساحت پلوم را کاهش می‌دهد (Xing and Davies, 1999; Garcia et al., 2002; Tarya et al., 2015;

باد عامل افزایش تنش برشی در سطح دریا است و به همین دلیل افزایش سرعت باد سبب اختلاط بیشتر در ستون آب شده و در صورت چشم‌پوشی از سایر عوامل (مانند مورفولوژی ساحل، زاویه بین جهت باد و جهت جریان سطحی، بتی متری بستر و غیره)، به خودی خود مساحت پلوم را کاهش می‌دهد (Xing and Davies, 1999; Garcia et al., 2002; Tarya et al., 2015;



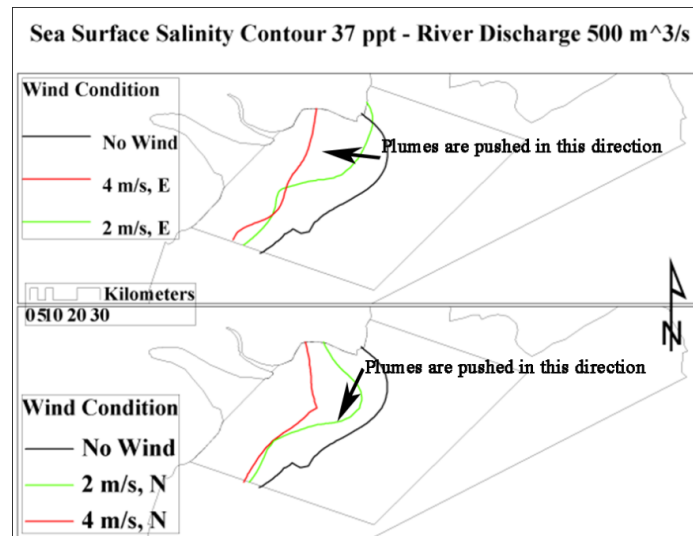
شکل ۸: مرز پلوم (خط هم‌بند شوری ۳۷ ppt) در دبی ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه و حالت‌های مختلف باد شمال‌غربی

از سواحل دور بوده و آب‌هایی که در نزدیکی سواحل تجمع می‌یابند در محدوده آن قرار نگیرد. با این راهکار پلوم در محدوده‌ای بررسی می‌شود که تا حد امکان خط ساحلی اثری بر گستردگی و شکل آن نداشته باشد. شکل ۹ نشان می‌دهد که مساحت پلوم در باد ۴ متر بر ثانیه شمالی و شرقی از مساحت آن در بادهای ضعیف‌تر کمتر است.

وزش بادهای جنوبی و غربی سبب منحرف شدن پلوم رودخانه به سمت شمال و شمال شرق می‌شود (با مرز پلوم در حالت بدون باد یعنی کنتور مشکی رنگ مقایسه شود). در این حالت فرایند کاهش مساحت پلوم به دلیل افزایش تنش برشی (با افزایش سرعت باد) نمی‌تواند افزایش مساحت پلوم به دلیل تجمع و گسترده شدن در سواحل شمالی را جبران کند. بنابراین همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد؛ با افزایش سرعت باد، تغییرات مشهودی در مساحت پلوم به نسبت بادهای شمالی و شرقی وجود ندارد

در نیمکره شمالی پلوم رودخانه‌ها تحت تاثیر نیروی کوریولیس به سمت راست منتشر می‌شوند (Montoya et al., 2017; Yu et al., 2010). اگرچه بادهای شرقی پلوم را مستقیماً وارد خور عبدالله می‌کنند، اما حرکت پلوم به سمت راست با وزش بادهای شمالی، به علت اصطکاک جریان با دیواره ساحلی دریا (سواحل دریا در جنوب غرب دهانه رودخانه) و ایجاد تاوایی (Vorticity) و تحت تاثیر نیروی کوریولیس نیز به داخل این خور منحرف می‌شود. همین موضوع به علاوه افزایش تنش برشی سبب می‌شود تا مساحت پلوم در باکس رودخانه کمتر شود.

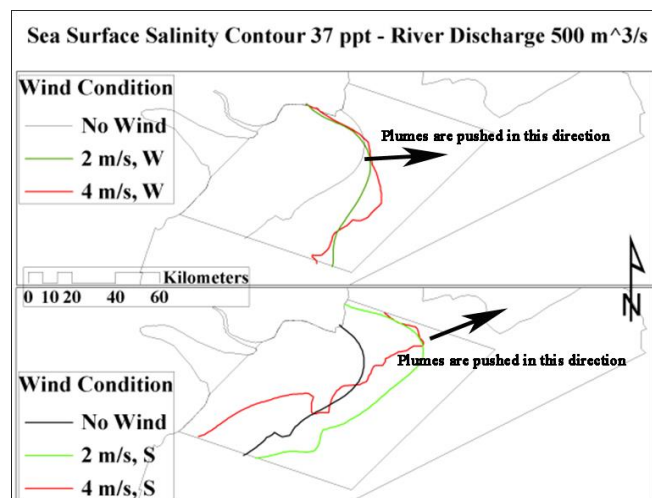
بنابراین همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد؛ با افزایش سرعت بادهای شمالی و شرقی، مساحت پلوم به مقدار زیادی کاهش می‌یابد زیرا بادهای شدیدتر در این جهت‌ها نیروی بیشتری برای انتقال پلوم به درون خور عبدالله و خارج کردن آن از باکس رودخانه دارند. باکس رودخانه به گونه‌ای انتخاب شد که تا حد امکان



شکل ۹: مرز پلوم (خط همبند شوری ۳۷ ppt) در دبی ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه و حالت‌های مختلف باد شمالی و شرقی

پلوم می‌شود. شکل ۸ به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد شمال غربی از ۸ به ۱۴ متر بر ثانیه مساحت پلوم کاهش می‌یابد. به طور کلی و به صورت خلاصه و همانطور که مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ آشکار می‌کند، پدیده برخورد پلوم با سواحل شمال غربی خلیج فارس و گسترده شدن آن بر اثر بادهای جنوبی و غربی، روند کاهش مساحت پلوم با افزایش تنش برشی (بر اثر افزایش سرعت باد) را جبران می‌کند، در حالی که هنگام وزش بادهای شمالی و شرقی این پدیده رخ نداده و سهم کاهش مساحت پلوم با افزایش تنش برشی بیشتر است.

وزش باد شمال غربی بر خلاف باد در سایر جهت‌ها (که سبب انتقال پلوم به سمت شمال یا جنوب می‌شوند)، دقیقاً در امتداد مسیر رودخانه و مسیر ورود آب به دریا است و به همین علت پلوم رودخانه را به طرفین منحرف نکرده و پلوم در امتداد مسیر رودخانه و ورود آب به دریا تشکیل می‌شود. بنابراین در این حالت تغییر مساحت پلوم به علت‌های برخورد آن با سواحل شمالی (بر اثر بادهای جنوبی و غربی) و یا نفوذ آن به درون خور عبدالله (بر اثر بادهای شمالی و شرقی) رخ نداده و آنچه بر مساحت پلوم اثرگذار است، افزایش تنش برشی (با افزایش سرعت باد) است که سبب کاهش مساحت



شکل ۱۰: مرز پلوم (خط همبند شوری ۳۷ ppt) در دبی ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه و حالت‌های مختلف بادهای غربی و جنوبی

۴. نتیجه گیری

رانده شدن بیشتر پلوم به سمت سواحل کویت و نفوذ به خور عبدالله می‌شود. این موضوع و عامل تنش باد هر دو سبب کاهش مساحت پلوم در این حالت خاص از شرایط باد می‌شود. به‌طور کلی پلوم رودخانه در شرایط مختلف باد به سه حالت کلی تقسیم می‌شود. در نوع یک پلوم به سمت سواحل شمالی، در نوع سه به سمت سواحل کویت منحرف می‌شود؛ پلوم نوع ۲ بدون انحراف است. با وجود اینکه شکل پلوم در حالت های مختلف باد کاملاً متفاوت، اما این تفاوت تنها به علت جابجایی توده آب سطحی است. این موضوع از شبهه بودن نمودارهای پراکندگی دما-شوری در حالت‌های مختلف اثبات می‌شود.

References:

- Abdolkhanian, N., Elmizadeh, H., Dadolahi sohrab, A., Savari, A. and Fayazmohammadi, M. 2018. Comparing modeling of pollution in Arvand River in the dry and wet seasons. *Journal of Marine Science and Technology*. 16: 13-24
- Abdullah, A. D., Gisen, J. I., Zaag, P. V. D., Savenije, H. H., Karim, U. F., Masih, I. and Popescu, I. 2016. Predicting the salt water intrusion in the Shatt al-Arab estuary using an analytical approach. *Hydrology and earth system sciences*. 20: 4031-4042.
- Azizpour, J., Chegini, V., Khosravi, M. and EINALI, A. 2014. Study of the physical oceanographic properties of the persian gulf, strait of hormuz and gulf of oman based on PG-GOOS CTD measurements. *Journal of the Persian Gulf*. 5: 37-48.
- Briker, J. D., Okabe, I. and Nakayama, A. 2006. Behavior of a small pulsed river plume in a strong tidal cross-flow in the Akashi Strait. *Environmental Fluid Mechanics*. 6: 203-225.
- Chao, S.Y. and Boicourt, W. C. 1986. Onset of estuarine plumes. *Journal of Physical Oceanography*. 16: 2137-2149.
- Chao, S.-Y. 1988. River-forced estuarine plumes. *Journal of Physical Oceanography*. 18: 72-88.
- Chen, C., Beardsley, R. C. and Cowles, G. 2006. FINITE VOLUME COASTAL OCEAN. *Oceanography*. 19: 78.
- Emery, K. O. 1956. Sediments and water of Persian Gulf. *AAPG Bulletin*, 40: 2354-2383.
- Fayazmohammadi, M. 2017. Numerical and field study of the effect of tides on sediment transport in Arvand River estuary. Ph.D. Thesis. School of Marine and Oceanographic Sciences. Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Iran. 155p.
- Garcia Berdeal, I., Hickey, B. and Kawase, M. 2002. Influence of wind stress and ambient flow on a high discharge river plume. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 107: 13-1-13-24
- Garvine, R. W. 1981. Frontal jump conditions for models of shallow, buoyant surface layer hydrodynamics. *Tellus*. 33: 301-312.
- Garvine, R. W. 1982. A steady state model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters. *Tellus*. 34: 293-306.
- Garvine, R. W. 1995. A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges. *Continental Shelf Research*. 15: 1585-1596.

- Goncalves, H., Teodpro, A. C. and 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: 1553-1563.
- Ioc, I. and In, B. 2003. Centenary edition of the GEBCO digital atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans. British Oceanographic Data Centre.
- Johns, W., Yao, F., Olson, D., Josey, S., Grist, J. and Smeed, D. 2003. Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred heat and freshwater budgets of the Persian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 108.
- Kamidis, N., Sylaios, G. and Tsihrintzis, B. 2015. Nestos River plume dynamics under variable physical forcing. *Panhellenic and International Geographical Conferences, Proceedings*, 549-566.
- Kämpfe, J. and Sadrasab, M. 2006. The circulation of the Persian Gulf: a numerical study. *Ocean Science*. 2: 27-41.
- Komijane, F., Nasrollahee, A., Nazari, N. and Naheid, S. 2014. The Persian Gulf wind analysis using meteorological synoptic stations data. *NIVAR Journal of Meteorological Organization*. 38: 27-44.
- Kourafalou, V. H., Oey, L. Y., Wang, J. D. and Lee, T. N. 1996. The fate of river discharge on the continental shelf: Modeling the river plume and the inner shelf coastal current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 101: 3415-3434.
- Lazem, L. F. 2014. Ecological Evaluation of the Shatt Al-Arab River and fish assemblage by Applying Geographical Information System (GIS). Ph.D thesis collage of Agriculture university of Basrah. Iraq. 134p.
- Liu, J. T., Chao, S.Y. and Hsu, R. T. 1999. The influence of suspended sediments on the plume of a small mountainous river. *Journal of Coastal Research*. 1002-1010.
- Mellor, G. L. and Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*. 20: 851-875.
- Montoya, L. J., Toro-Botero, F. M. and Gomez-Giraldo, A. 2017. Study of Atrato river plume in a tropical estuary: Effects of the wind and tidal regime on the Gulf of Uraba, Colombia. *Dyna*. 84: 367-375.
- Nozarpour, N., Nabavi, M., Ronagh, M., Archangi, B. and Sakhaei, N. 2018. Molecular and phylogenetic investigation of *Chiromantes boulengeri* (Decapoda, Brachyura, Sesamidae) species from Arvand River. *Journal of Marine Science and Technology*. 17: 36-43.
- Ou, S., Zhang, H., Wang, D.X. and He, J. 2007. Horizontal characteristics of buoyant plume off the Pearl River Estuary during summer. *Journal of Coastal Research*. 23: 652-657.
- Padman, L. and Erofeeva, S. 2005. Tide Model Driver (TMD) Manual. Earth and Space Research.
- Reynolds, R. M. 1993. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*. 27: 35-59.
- Saad, M. A. 1978. Seasonal variations of some physicochemical conditions of Shatt al-Arab estuary, Iraq. *Estuarine and Coastal Marine Science*. 6: 503-513.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*. 91: 99-164.
- Tarya, A., Van Der Vegt, M. and Hoitink, A. 2015. Wind forcing controls on river plume spreading on a tropical continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 120: 16-35.

- UN-ESCWA, B. G. R. 2013. United Nations economic and social commission for western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Inventory of Shared Water Resources in Western Asia, Beirut.
- Wang, Q., Guo, X. and Takeoka, H. 2008. Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: A model study. Journal of Geophysical Research: Oceans. 113.
- Wiseman, W. and Garvine, R. 1995. Plumes and coastal currents near large river mouths. Estuaries. 18: 509.
- Wright, J. L. 1974. A hydrographic and acoustic survey of the Persian Gulf. Part I. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- Xing, J. and 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: 1437-1483.
- Yankovsky, A. E. and Chapman, D. C. 1997. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. Journal of Physical oceanography. 27: 1386-1401.
- Yu, Y., Zhang, H. and Lemckert, C. 2010. Numerical Study on River Plumes on a Southern Hemisphere Coast. The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2010. International Society of Offshore and Polar Engineers.



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Numerical Modelling of Arvandrud River Plume and the impact of wind and River Discharge on the plume structure By Three Dimensional and Hydro dynamical Model (FVCOM)

Masoud Sadrinasab¹, Abbas Einali^{2*}, Mohammad Akbarinasb³, Mohammad Ali Najarpour²

¹ Department of environmental engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Department of Marine Physics, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran.

³ Department of Marine Physics, Faculty of Marine Science and Oceanography, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

*Corresponding Author E-mail: abbaseinaly@yahoo.com

Received: 28 February 2018

Accepted: 8 January 2019

DOI: [10.22113/JMST.2019.122183.2135](https://doi.org/10.22113/JMST.2019.122183.2135)

Abstract

Arvandrud River Plume which is the main source of fresh water in the Persian Gulf and in addition its catchment area is settlement for about 54 million people, is one of the most important phenomena in coastal zones. The river is the boundary line between Iran and Iraq and its plume extended in Iran, Iraq and Kuwait territory in Persian Gulf. Oceanographic studies are infeasible in the river and in its mouth due to geographic, politics, and security problems in the region. Despite the lack of in-situ data, this study is a serious step to the investigation to river plume. In this study salinity, temperature and water circulation of Persian Gulf were simulated by using oceanographic hydrodynamic model, FVCOM. Then, effects of wind and river discharge on structure of Plumes were investigated. For this purpose, 14 wind and 8 river discharge conditions have been used. The results show the river has a surface-advected plume that is highly affected by wind. The river plume area decreased with increasing wind speed. Three types of plumes were formed by different wind conditions, at the mouth of the river. Plume type 1 diverted toward the northwest coast of Persian Gulf and plume type 3 diverted toward the Kuwait coast. Plume type 2 was almost straight and was not diverted to the sides. The T-S diagram of surface water mass was very similar to all three modes, as a result, the plume shape and displacement is affected by wind.

Keywords: Arvandrud River, River plume, River discharge, FVCOM.

List of Table and Figures

Figure (1): Computational grid of model.

Figure (2): Computational grid of model in northwestern of the Persian Gulf in where freshwater of Arvandrud River is discharged into the Persian Gulf.

Figure (3): Top Left: Model domain in northwestern of the Persian Gulf and location of points where model stability (point 1) and tidal properties (point 2) are investigated and salinity measurement station are located in the nearest position to the river mouth in (Abdullah et al., 2016) study (point 3). Top middle: Sea surface salinity in Arvandrud River mouth and the river plume formation in no wind condition. Top right: Salinity Profile in different location of the river in March. Middle and bottom left: Model output and Admiralty data of tide in point 2. Middle and bottom right: Time series of sea surface salinity and temperature in point 1 and 2 in Last two years of modeling.

Figure (4): Sea surface salinity in river discharge 300 m³/s in no wind and low water slack condition. Top right: Sea surface salinity in the river mouth that show fresh water interring into the Persian Gulf. Top Left: location.

Figure (5): Sea surface salinity in different wind condition (Respectively from top to bottom: No wind, 4m/s S, 8m/s NW). On the right side, T-S diagram are shown corresponding for each condition.

Figure (6): Sea surface salinity contour (37 ppt) as River plume border in different river discharge (300 to 650 m³/s)

Figure (7): River plume border (SSS 37 ppt) in river discharge 500 m³/s for different wind condition and formation of 3 type of river plume. Plume type 1(right), Plume type 2(middle) and Plume type 3(left).

Figure (8): River plume border (SSS 37 ppt) in river discharge 500 m³/s for different northwest wind.

Figure (9): River plume border (SSS 37 ppt) in river discharge 500 m³/s for north and east wind.

Figure (10): River plume border (SSS 37 ppt) in river discharge 500 m³/s for west and south wind.