



مقاله پژوهشی

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



## بررسی اثر اروندرود بر تغییر شوری خلیج فارس با استفاده از مدل سازی عددی

امید ماه پیکر<sup>\*</sup>، محمدرضا خلیل آبادی<sup>۱</sup>، کریم کنارکوهی<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی اوقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.
۲. گروه فیزیک دریا، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری های هوا دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران.

\* نویسنده مسؤل، پست الکترونیک: [Omidd8@gmail.com](mailto:Omidd8@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2019.156240.2224

### چکیده

اروندرود، به عنوان مهم ترین ورودی آب شیرین خلیج فارس شناخته می شود و نقش مهمی در کنترل شوری خلیج فارس به خصوص در قسمت های شمالی آن دارد. از آنجاکه آب قسمت های شمالی خلیج فارس به دلیل جزر و مد در معرض تبادل با خورها و تالاب های مهمی (از جمله خور موسی و تالاب شادگان) قرار دارد، میزان شوری آن، اهمیت فوق العاده ای در اکوسیستم منطقه و سواحل خوزستان دارد. در این مطالعه، با استفاده از مدل مایک ۳ که بر اساس حل سه بعدی معادلات ناویر استوکس، با فرض تراکم ناپذیری، بوزینسکی و فشار هیدرواستاتیک استوار است، اثر اروندرود بر شوری خلیج فارس در دو حالت، با دبی ۱۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه و بدون وجود اروندرود بررسی شده است. نتایج، نشان می دهد که با صرف نظر از ورودی اروندرود، شوری در سواحل مجاور خوزستان تا ۷ PSU افزایش می یابد و بر نیمه جنوبی خلیج فارس در سمت سواحل عربی اثر می گذارد. همچنین به طور غیرمستقیم می توان نتیجه گرفت که دبی اروندرود بر میزان آب ورودی و خروجی از تنگه هرمز اثر چندانی ندارد.

واژگان کلیدی: خلیج فارس، مدل سازی، مایک ۳، شوری، اروندرود.

## ۱. مقدمه

۲- در طول ساحل ایران، دبی رودخانه هندیجان و هیرمند حدود ۲۰۳۴ متر مکعب بر ثانیه گزارش شده است که این مقادیر نیازمند تأیید هستند و تغییرات آن‌ها باید تعیین شود (Pous et al., 2013).

بیشتر مطالعاتی که به منظور مدل‌سازی گردش در خلیج فارس صورت گرفته است، فقط دسته اول رودخانه‌ها را مدنظر قرار داده‌اند. آهنگ بارش در خلیج فارس بسیار ضعیف است و مقداری در حدود ۷ سانتیمتر بر سال دارد که این مقدار یک‌چهارم مقدار ورودی رودخانه‌ها به خلیج فارس است. مقدار تبخیر سالانه از خلیج فارس ۱/۸۴ متر بر سال است (به طور متوسط ۱۳۴۵۰ متر مکعب بر ثانیه). میزان آب ورودی و خروجی از تنگه هرمز نیز معادل با میانگین آهنگ ورودی‌های خلیج فارس و تبخیر یعنی ۳۳/۷ و ۳۲/۱ متر بر سال است (Xue and Eltahir, 2015). آب‌های سطحی ورودی از طریق تنگه هرمز با منشأ اقیانوس هند دمایی در حدود ۲۳-۲۶ درجه سانتی‌گراد در زمستان و ۳۰-۳۲ درجه سانتی‌گراد در تابستان دارد و محدوده شوری آن ۳۶/۵-۳۷/۲ PSU است.

Abdolkhanian et al. (2018) پخش آلودگی در اروندرود را مدل‌سازی کردند. بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی پخش آلودگی در اروندرود، نشان داد که نحوه پخش آلودگی در اروندرود تابع جریان و متناسب با مکان و زمان رهاسازی آلودگی است.

Sadrinasab et al. (2019) حساسیت ساختار سطحی پلوم اروندرود نسبت به تغییرات دبی و باد را مورد بررسی قرار دادند. به این منظور ۱۴ حالت مختلف باد به‌علاوه ۸ حالت مختلف دبی به مدل اعمال شد. نتایج نشان داد که پلوم رودخانه اروندرود از نوع پلوم گسترده در سطح بوده و حساسیت بالایی نسبت به تغییرات باد دارد. افزایش سرعت باد عموماً سبب کاهش مساحت پلوم شد. حالت‌های مختلف باد سبب ایجاد سه نوع پلوم در دهانه این رودخانه شد. در نوع اول پلوم به سمت سواحل شمال

توسعه آبیاری در نواحی بالادست رودخانه‌های کارون و اروندرود و افزایش برداشت آب از این رودخانه‌ها، به دلیل ساخت سدهای مخزنی در ایران، ترکیه، سوریه و تخریب زه‌آب‌های شور به ویژه در فصول خشک سال، منجر به افت کیفیت آب و کاهش دبی اروندرود در محل ریزش به خلیج فارس شده است. این امر، سبب نفوذ آب دریا به داخل رودخانه‌ها شده و علاوه بر شوره‌زارکردن اراضی کشاورزی مناطق جنوبی خوزستان، منابع آب آشامیدنی را با تهدید جدی مواجه کرده است.

از سوی دیگر، کاهش دبی اروندرود علاوه بر ضرر و زیان‌های اقتصادی و تجاری از منظر قابلیت کشتیرانی (به‌عنوان تنها رودخانه قابل کشتیرانی در ایران)، منجر به افزایش شوری در قسمت‌هایی از خلیج فارس می‌شود؛ زیرا مهم‌ترین منبع ورودی آب شیرین به خلیج فارس است و باعث تعدیل شوری آب در آن می‌شود و یکی از عوامل مهم در رشد و شکوفایی گونه‌های مختلف آبزیان است و تغییرات آن، بقا، سوخت‌وساز و پراکنش ماهیان را طی دوره تکامل تحت تأثیر قرار می‌دهد (Varsamos et al., 2005).

بیشتر رودخانه‌های ورودی به خلیج فارس، در بخش شمال غربی واقع شده‌اند. دو گروه از رودخانه‌ها که به خلیج فارس می‌ریزند، عبارت‌اند از:

۱- اروندرود در نزدیکی مرز عراق، که از سه رودخانه دجله، فرات و کارون تشکیل شده است. مقادیر مختلفی برای دبی جریان این رودخانه طی مطالعات قبلی گزارش شده است: که این مقادیر از ۱۶۰ متر مکعب بر ثانیه تا ۳۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه را شامل می‌شود (Reynolds, 1993). به‌طور میانگین مقدار ۱۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه را می‌توان برای این دبی در نظر گرفت. Saleh (2010) گزارش داد که متوسط ورودی رودخانه در طول یک سال ۱۵۷۶ متر مکعب بر ثانیه است که بیشترین جریان فصلی بین مارس تا می است.

فرض تراکم‌ناپذیری، بوزینسکی و فشار هیدرواستاتیک استوار است. معادله پیوستگی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

و مؤلفه‌های افقی معادله اندازه حرکت (تکانه) در راستای x و y به ترتیب عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ &- \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ &- \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\ &+ F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &+ u_s S \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} &= -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ &- \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ &- \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \\ &- \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) \\ &+ F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ &+ v_s S \end{aligned} \quad (2)$$

کمیت‌های استفاده شده در این معادلات عبارت‌اند از: t زمان؛ x، y و z راستای دستگاه مختصات کارتزین؛  $\eta$  نوسان سطح آب؛ d عمق آب در حالت آرام؛  $h = \eta + d$  عمق کل آب؛ u، v و w مؤلفه‌های سرعت به ترتیب در راستای x، y و z؛  $f = 2\Omega \sin\phi$  پارامتر کوریولیس ( $\Omega$ ) سرعت زاویه‌ای چرخش زمین و  $\phi$  عرض جغرافیایی؛ g شتاب جاذبه زمین؛  $\rho$  چگالی آب؛  $s_{yx}$ ،  $s_{xy}$ ،  $s_{xx}$  و  $s_{yy}$

غربی خلیج فارس و در نوع سوم به سمت سواحل کویت منحرف می‌شود. در نوع دوم پلوم در امتداد مسیر ورود آب رودخانه به دریا حرکت کرده و به طرفین منحرف نمی‌شود.

Tilburg et al. (2015) به بررسی اثرات بارش، ورودی رودخانه، کاربری اراضی و گردش ساحلی بر کیفیت آب در سواحل Maine پرداختند. در این مطالعه، رابطه بین کیفیت آب و این پارامترها در چندین نقطه درون خلیج Maine بررسی شده است و از مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه بر اساس اندازه‌گیری‌های آب و هوایی موجود برای پیش‌بینی کیفیت آب در پنج نقطه ساحلی استفاده شده است. تحلیل داده‌های ۱۲ ساعته نشان داد که در فصل پرآبی رودخانه یا بارش، کیفیت آب کاهش پیدا می‌کند.

Kako et al. (2016) به مطالعه اثر رودخانه Changjiang بر روی SST در دریای چین شرقی پرداختند. در این تحقیق، چگونگی تأثیر وجود رودخانه بر چینه‌بندی لایه سطحی اقیانوسی بر اساس مدلی که در آن اثر رودخانه نادیده گرفته شده بود، بررسی گردید. نتایج نشان داد که این رودخانه اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش دمای سطحی تابستان در این ناحیه دارد. همچنین مقایسه دو مدل نشان داد که فرآیندهای قائم سهم فراوانی در افزایش دمای SST دریای چین شرقی دارند، درحالی‌که فرارفت افقی، نقش مهمی در کاهش SST در فصل تابستان ایفا می‌کند.

## ۲. مواد و روش‌ها

مدل هیدرودینامیک مایک قادر است از مختصات کروی، کارتزین و مختصات قائم سیگما استفاده کند. مدل می‌تواند در راستای قائم به صورت ترکیبی از مختصات Z و سیگما، هم‌زمان استفاده کند. برای سادگی بیشتر، معادلات فقط در دستگاه مختصات کارتزین ارائه می‌شوند و از تکرار آن‌ها در دستگاه‌های دیگر خودداری می‌شود. مدل بر اساس حل سه بعدی معادلات ناویر استوکس، با

پیوستگی به دست می‌آید؛ بنابراین معادله دقیق تری به وسیله انتگرال قائم معادله پیوستگی حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS + \hat{P} - \hat{E} \quad (5)$$

در این معادله  $\hat{E}$  و  $\hat{P}$  به ترتیب نرخ تبخیر و بارش هستند و  $\bar{u}$  و  $\bar{v}$  میانگین قائم سرعت‌های افقی هستند:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (6)$$

سیال تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود؛ بنابراین چگالی  $\rho$  به فشار بستگی ندارد و فقط از طریق معادله حالت تابع دما  $T$  و شوری  $S$  است:

$$\rho = \rho(T, S) \quad (7)$$

در این تحقیق از داده‌های عمق‌سنجی JEBCO با دقت حدود یک کیلومتر استفاده شده است. سپس در قسمت Mesh Generator نرم‌افزار مایک، شبکه محاسباتی نامنظم و مثلثی مدل شامل ۱۰۶۹۹ المان و ۶۱۹۶ گره ساخته شد (شکل ۱). مرزهای محدوده شامل دو مرز است که یکی در قسمت شرق واقع شده است و مرز اقیانوسی محسوب می‌شود؛ به طوری که محدوده مدل‌سازی را به دریای آزاد متصل می‌کند و دیگری مرز رودخانه‌ای در قسمت شمال غربی خلیج فارس است که به‌عنوان تنها تأمین‌کننده آب شیرین خلیج فارس محسوب می‌شود.

ماژول هیدرودینامیک برنامه مایک نیز شرط CFL برای پایداری به کار می‌رود که به صورت زیر است:

$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (8)$$

مؤلفه‌های تانسور تنش تشعشی؛  $\vartheta_t$  لزجت آشفته (یا گردابی)؛  $p_a$  فشار هوا؛  $S$  بزرگی دبی منبع نقطه‌ای؛  $(u_s, v_s)$  سرعت ورود دبی به منطقه. جملات تنش افقی با استفاده از یک رابطه گرادیان تنشی به شکل ساده‌شده زیر توصیف می‌شوند:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (3)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

در اینجا  $A$  لزجت افقی گردابی است.

شرایط مرزی بستر و سطح برای  $u$ ،  $v$  و  $w$  به صورت زیر می‌باشند:

$$At \ z = \eta:$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0,$$

$$3. \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

$$At \ z = -d:$$

$$4. \ u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0,$$

$$5. \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (4)$$

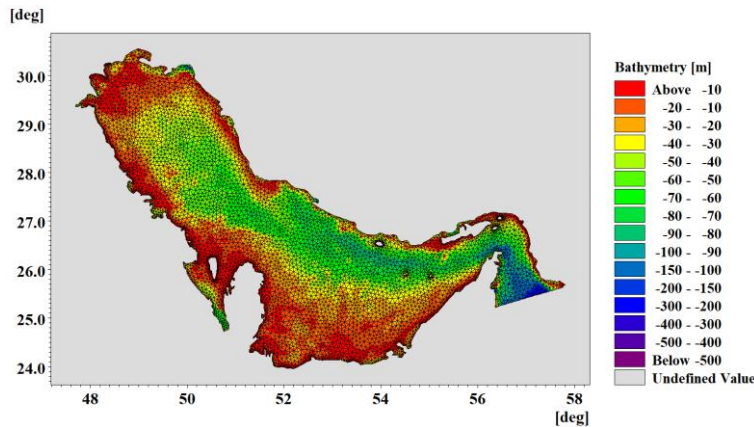
$(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  و  $(\tau_{bx}, \tau_{by})$  مؤلفه‌های تنش‌های باد در سطح آب، و تنش بستر کف آب هستند.

عمق کل آب  $h$  می‌تواند از شرط مرزی جنبشی در سطح به دست آید و میدان سرعت از معادلات اندازه حرکت و

برای مقیاس قائم مدل نیز از دستگاه مختصات سیگما به تعداد ۵ لایه استفاده شده است. در مدل‌هایی که با یکی از روش‌های عددی المان محدود و یا تفاضل محدود اجرا می‌شوند، پایداری و همگرایی مدل به مشخصاتی همچون گام زمانی، فاصله گره‌های شبکه و غیره بستگی دارد. در

ارتباط خلیج فارس با آب‌های اقیانوسی در نظر گرفته شده است. در این مرز، برای تغییرات تراز سطح آب از داده‌های بندر جاسک در سایت مدیریت آب‌نگاری و امور جزر و مدی مربوط به سال ۲۰۱۸ استفاده شده است

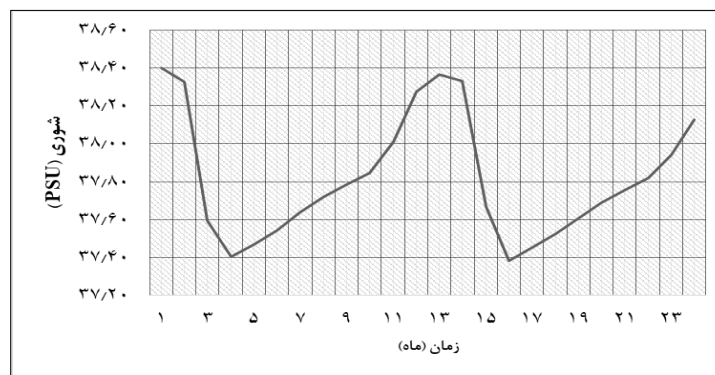
بدین منظور و با توجه به ابعاد مش و همچنین گام زمانی معادلات که بین ۰/۰۱ تا ۳۰ ثانیه است، مقدار CFL بحرانی ۰/۸ محاسبه شد که برای پایداری مدل مقادیر آن باید کمتر از این مقدار باشند. مرز شرقی مدل برای



شکل ۱: شبکه استفاده شده در مدل

بود. در واسنجی مدل، ارتفاع زبری بستر نقش مهمی را ایفا می‌کند. این ضریب در تنظیم و کنترل سرعت جریان و دامنه و فاز جزر و مدی نمایان می‌شود. مدل به ازای ارتفاع زبری ۰/۱۳، ۰/۱۵، ۰/۱۷ و ۰/۳۷۷ متر اجرا گردید و به ازای ضریب ۰/۱۵ متر بهترین تطابق حاصل شد. پس از اجرای مدل به مدت ۸ سال، میانگین ماهیانه شوری در نقطه‌ای واقع در مرکز خلیج فارس استخراج گردید (نقطه مرکزی شکل ۳) و حاکی از پایداری مدل بود که نتیجه آن در شکل ۲ به ازای دو سال نهایی اجرای مدل نشان داده شده است (معیار تمام داده‌ها بر اساس سال میلادی است).

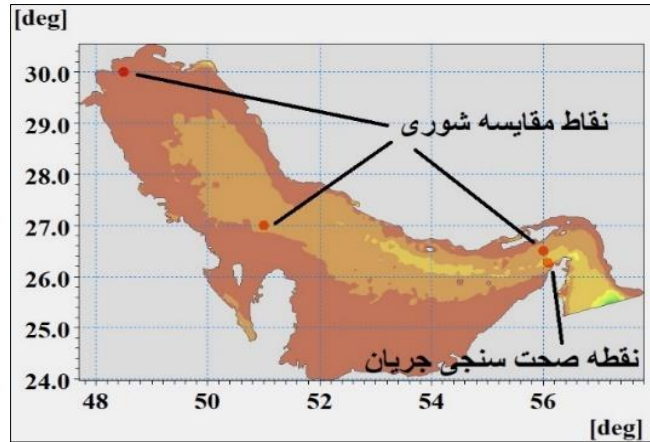
دما و شوری نیز به صورت روزانه که از میانگین ۵۰ ساله داده‌های NOAA حاصل شده بود، اعمال گردید. مرز رودخانه‌ای مدل نیز به صورت یک شار ورودی با دما و شوری متفاوت به حوضه خلیج فارس لحاظ شده است. دمای این مرز به صورت روزانه و با میانگین‌گیری بلندمدت و شوری آن نیز به صورت ثابت برابر با 5PSU در نظر گرفته شده است. در مورد دبی با توجه به عدم اندازه‌گیری دقیق آن تا به امروز مطابق با مطالعات قبلی به صورت ثابت  $1400 \text{ m}^3/\text{s}$  اعمال شد (Pous et al., 2015). تراز اولیه سطح آب هنگام شروع اجرای مدل یک متر و دما و شوری اولیه نیز به ترتیب  $22^\circ\text{C}$  و 38PSU



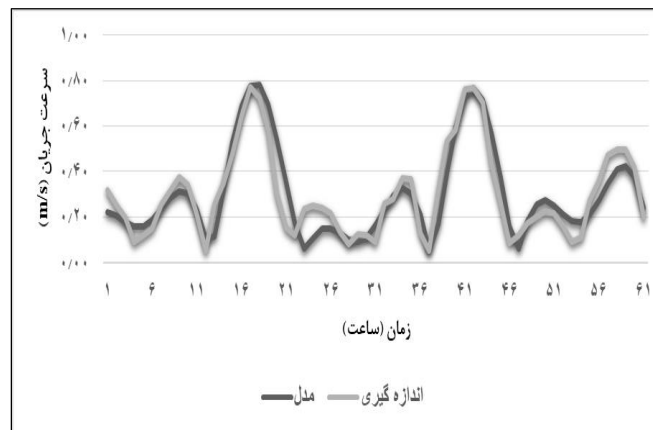
شکل ۲: میانگین ماهیانه شوری طی دو سال آخر اجرای مدل

پیوسته مقایسه گردید که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ قابل‌مشاهده است (محور افقی زمان برحسب ساعت است).

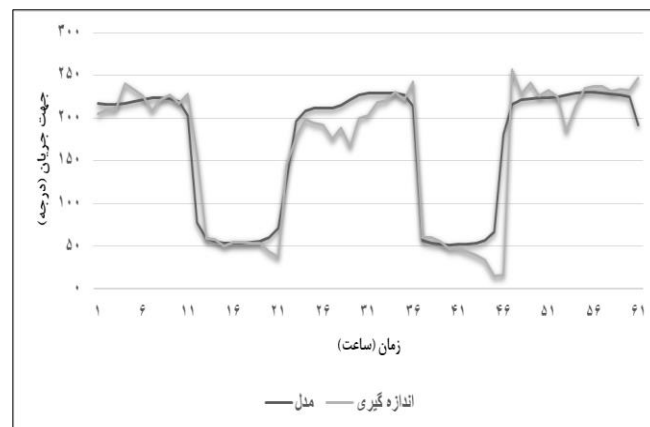
همچنین برای مقایسه سرعت و جهت جریان، نتایج خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری در عمق ده متری در حوالی تنگه هرمز (شکل ۳) به مدت ۶۰ ساعت



شکل ۳: موقعیت نقاط بررسی جریان و مقایسه شوری



شکل ۴: مقایسه سرعت جریان با داده‌های اندازه‌گیری

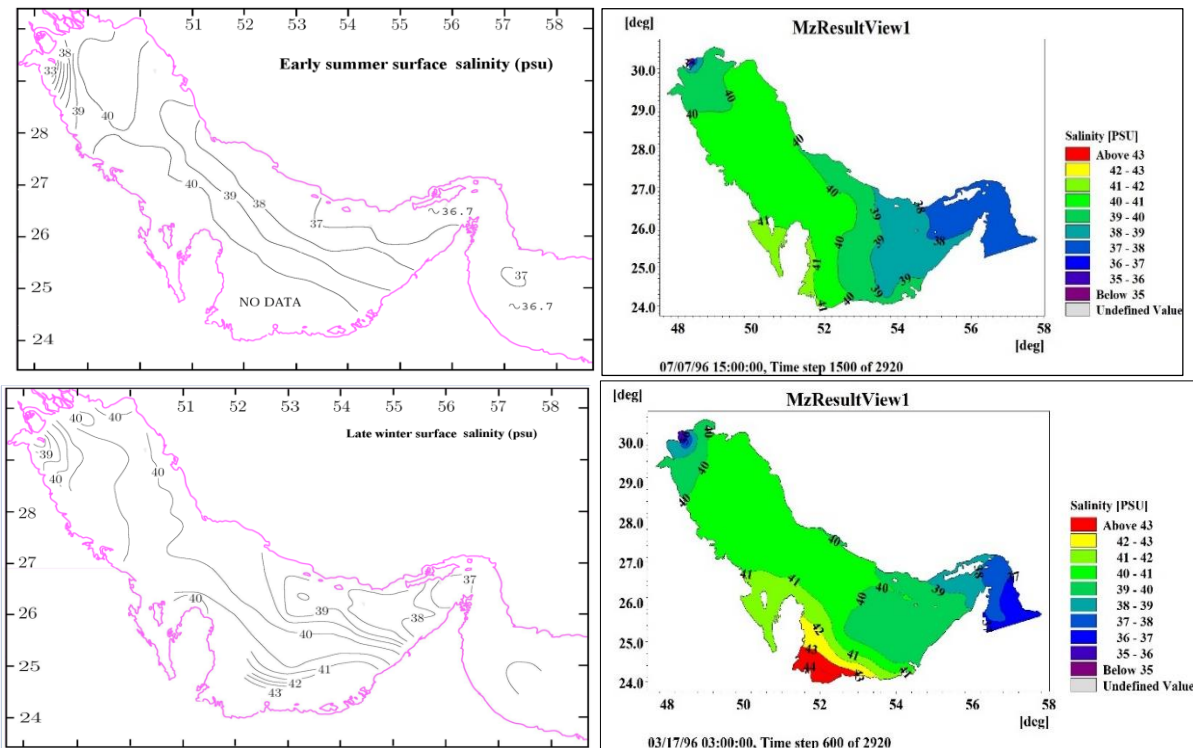


شکل ۵: مقایسه جهت جریان با داده‌های اندازه‌گیری

### ۳. نتایج

دو سال با شرایط اولیه و مرزی یکسان، یکبار با در نظر گرفتن اروندرود و با دبی ۱۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه و بار دیگر بدون در نظر گرفتن آن اجرا گردید و نتایج در سال دوم اجرای هر دو مدل با هم مقایسه گردید.

برای بررسی اثر اروندرود بر تغییرات شوری، مدل با اعمال نیروهای جزر و مد، گرما-شوری و باد و دبی رودخانه ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه اجرا گردید (شکل ۶) و پس از پایداری،



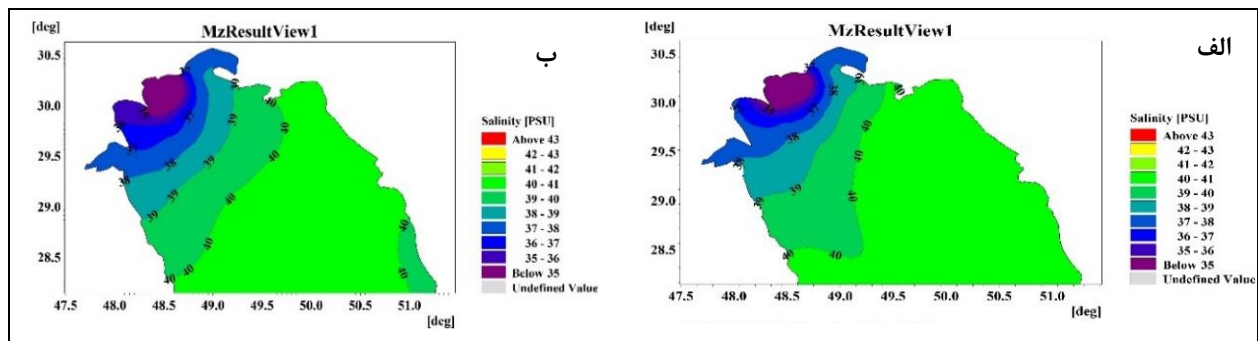
شکل ۶: مقایسه نتایج شوری سطحی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط رینولدز در اوایل تابستان (بالا) و اواخر زمستان (پایین)

متوازن صورت گیرد (شکل ۷). از سوی دیگر وزش باد باعث می‌شود انتشار و پخش شوری در سطح آب بهتر صورت پذیرد؛ بنابراین فاصله بین خطوط هم‌شوری در زمستان بیشتر می‌شود. همچنین تا شعاع حدود ۵۰ کیلومتری از محل دهانه شوری کمتر از ۳۵ PSU است. در شکل ۸ توزیع شوری سطحی در فصل تابستان در هر دو مدل ملاحظه می‌شود. شکل ۸-الف نشان می‌دهد که شوری در محدوده میانی خلیج فارس بین ۴۰ تا ۴۱ متغیر است. در شکل ۸-ب و در حالی که از اثر اروندرود صرف‌نظر شده است، شوری در محدوده سواحل خوزستان

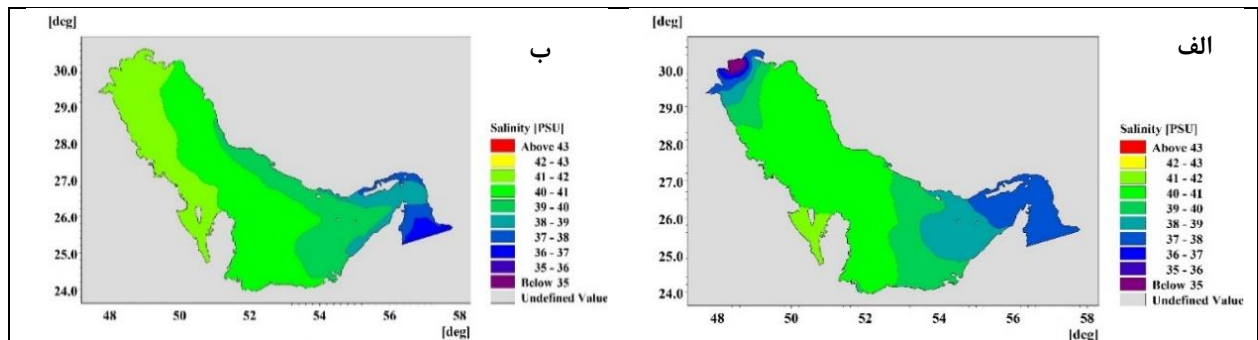
ابتدا به بررسی وضعیت پلوم شوری سطحی در مصب رودخانه می‌پردازیم. در فصل تابستان پیشروی پلوم به صورت نامتقارن است و در سمت سواحل عربی گسترش بیشتری دارد و این ناشی از گردش کلی خلیج فارس است که نحوه توزیع شوری سطحی در دهانه را تعیین می‌کند. در فصل زمستان پلوم شوری تا حدودی متقارن می‌شود و این به دلیل تقویت وزش بادهای به‌خصوص بادهای غربی و شمال‌غربی است به طوری که سمت وزش این بادهای در تقابل با گردش کلی خلیج فارس است و باعث می‌شود توزیع شوری سطحی به صورت

شوری در لایه نزدیک بستر با هم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در برخی از نواحی شوری آب در نقاط سطحی نسبت به نقاط نزدیک بستر بیشتر است که این به دلیل ایجاد ترموکلاین فصلی و لایه‌بندی دمایی در تابستان می‌باشد به طوری که باعث می‌شود یک پایداری نسبی در این فصل ایجاد شود و اختلاط قائم آب در این فصل به کندی صورت گیرد.

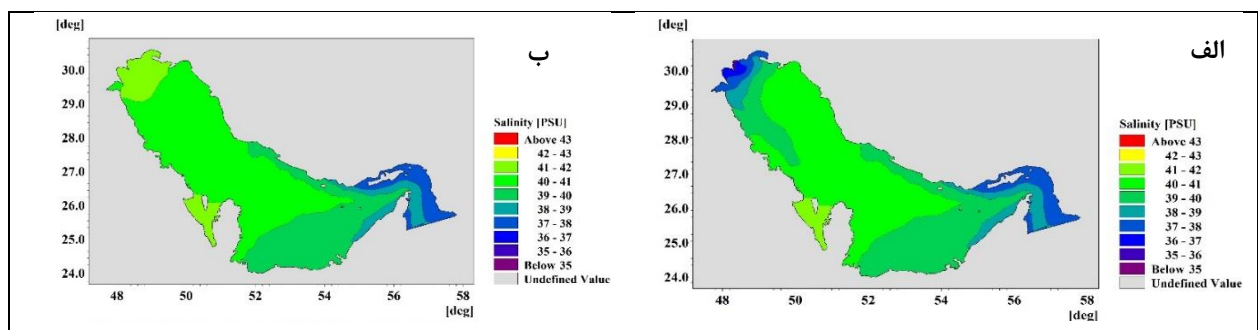
و سمت سواحل عربی تغییر محسوسی داشته است و بین ۴۱ تا ۴۲ تغییر می‌کند؛ بنابراین تا شعاع ۵۰ کیلومتری افزایش شوری حداقل ۷ PSU رخ می‌دهد. علاوه بر این رژیم شوری خلیج فارس در این حالت به دو قسمت تبدیل شده: ناحیه‌ای که تحت تأثیر ورود آب سبک‌تر از دریای عمان است و نیمه شرقی خلیج فارس را در بر گرفته است و ناحیه‌ای که در اثر تبخیر، آب شور ایجاد شده و نیمه غربی خلیج فارس را تشکیل می‌دهد. در شکل ۹ توزیع



شکل ۷: پلوم شوری سطحی در دهانه ارونرد (الف) در فصل تابستان و (ب) در فصل زمستان



شکل ۸: توزیع شوری در لایه سطحی فصل تابستان (الف) با در نظر گرفتن ارونرد و (ب) بدون در نظر گرفتن آن

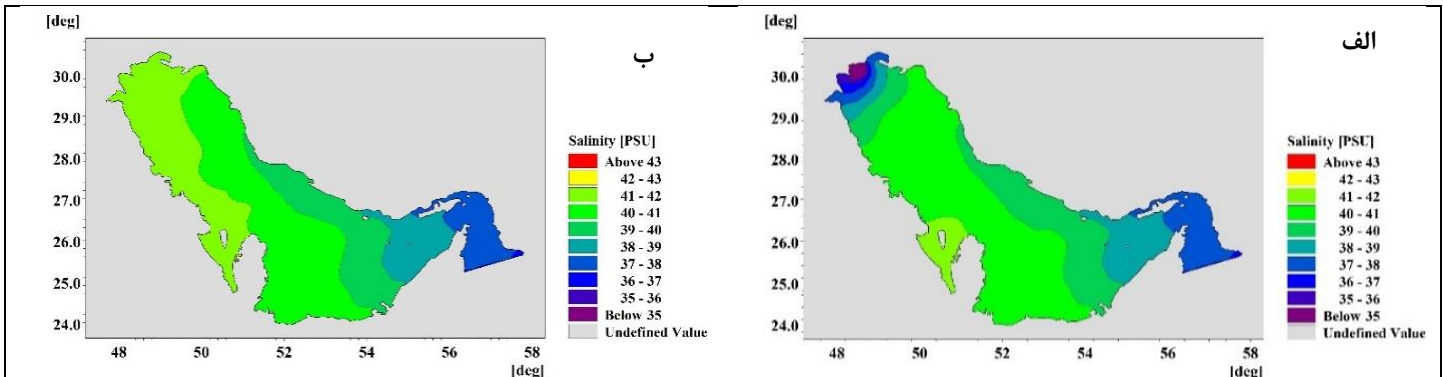


شکل ۹: توزیع شوری در لایه بستر فصل تابستان (الف) با در نظر گرفتن ارونرد و (ب) بدون در نظر گرفتن آن

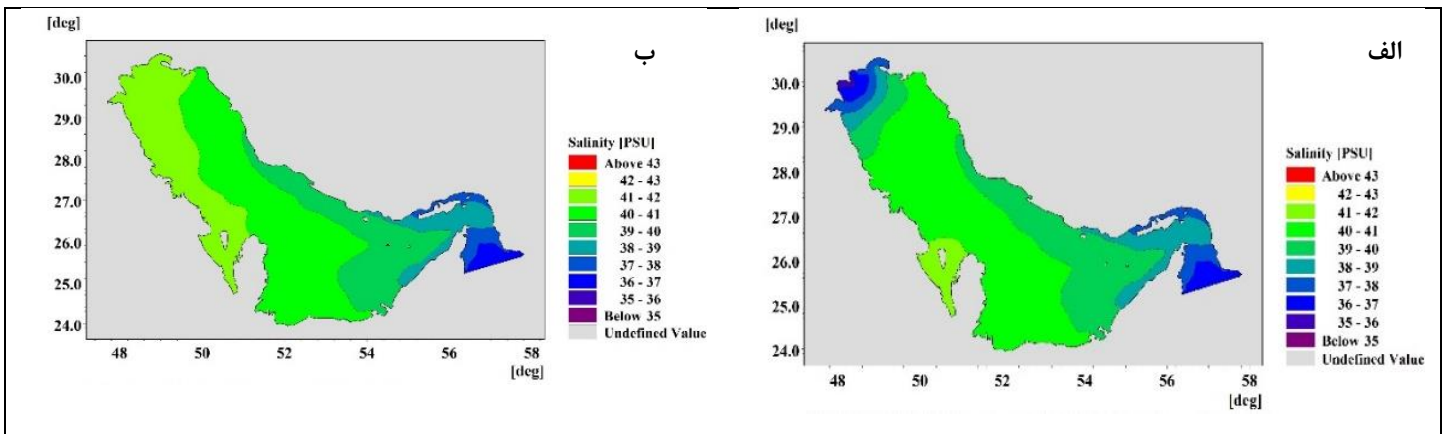


در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ که نتایج فصل زمستان باهم مقایسه شده‌اند، شاهد تغییرات بسیار کم بین لایه‌های سطح و بستر در هر دو حالت هستیم و این به دلیل تقویت اثرات اختلاط در این فصل است و به جز محدوده تنگه هرمز که اثر اختلاف شوری در سطح و بستر غالب

است، در سایر نواحی شوری از سطح تا بستر تقریباً یکنواخت است. همچنین اثر حذف اروندرود در لایه بستر نسبت به فصل تابستان گسترش بیشتری دارد و در این شرایط احتمالاً تبخیر بیشتر باعث افزایش شوری شده است.



شکل ۱۰: توزیع شوری در لایه سطحی فصل زمستان (الف) با در نظر گرفتن اروندرود و (ب) بدون در نظر گرفتن آن



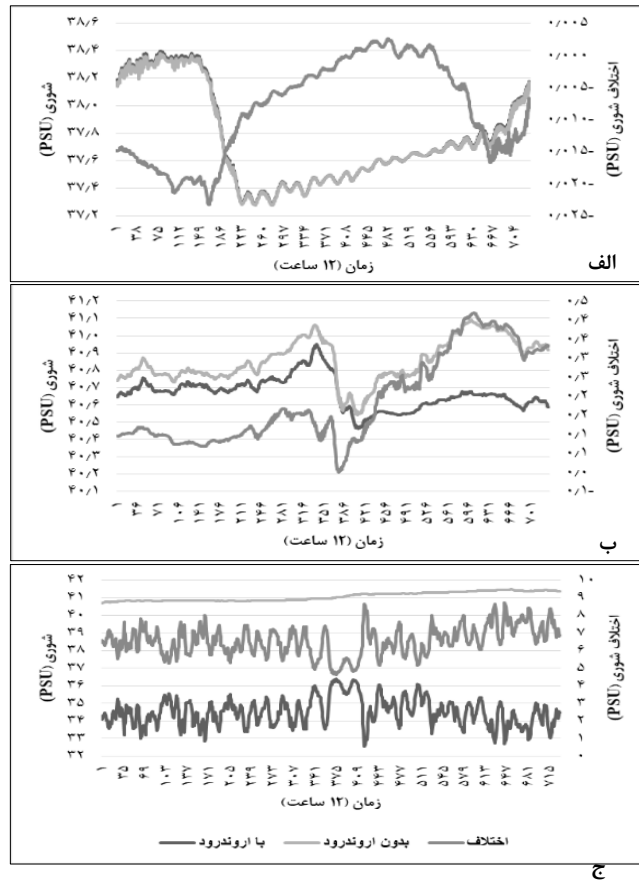
شکل ۱۱: توزیع شوری در لایه بستر فصل زمستان (الف) با در نظر گرفتن اروندرود و (ب) بدون در نظر گرفتن آن

به منظور مقایسه کمی تغییرات سالانه شوری، سه نقطه واقع در عمق یک متری و در نزدیکی تنگه هرمز، مرکز خلیج فارس و رأس خلیج فارس در هر دو حالت با هم قیاس شد (نقاط شکل ۳). در تنگه هرمز تغییرات شوری سطح طی یک سال تغییرات چندانی نداشته است و نمودار شوری در هر دو حالت بر هم منطبق هستند. در نقطه میانی خلیج فارس اختلاف اندکی بین دو نمودار مشاهده می‌شود و این اختلاف در فصل تابستان و پاییز

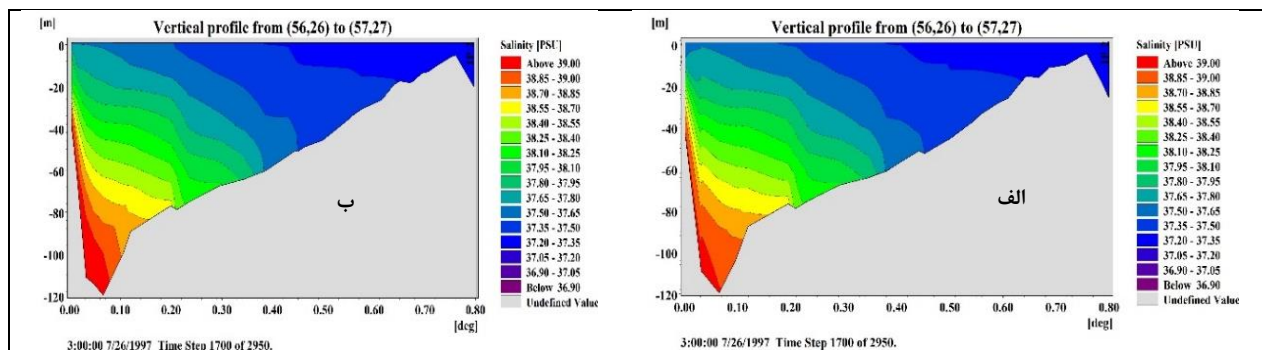
بیشتر است که به دلیل بیشتر بودن میزان تبخیر در این فصل است. نهایتاً در نقطه سوم و در رأس خلیج فارس اختلاف فراوانی بین دو نمودار مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار این اختلاف به  $8/72$  PSU نیز می‌رسد و میانگین آن  $6/5$  PSU است (شکل ۱۲). برای بررسی اثر رودخانه بر شوری آب خروجی از تنگه هرمز، نیم‌رخ شوری و نمودار تغییرات سالانه آن در عمق  $50$  متری همان نقطه قبلی در هر دو حالت مقایسه شده است.

و خروجی خلیج فارس تأثیر چندانی ندارد (شکل ۱۳). همچنین تغییرات ۱۲ ساعته شوری نشان می‌دهد که اختلاف فاحشی رخ نمی‌دهد و تنها در اواخر تابستان و پاییز به دلیل وزش بادها و افزایش تبخیر سطحی اندکی اختلاف بین دو نمودار وجود دارد (شکل ۱۴).

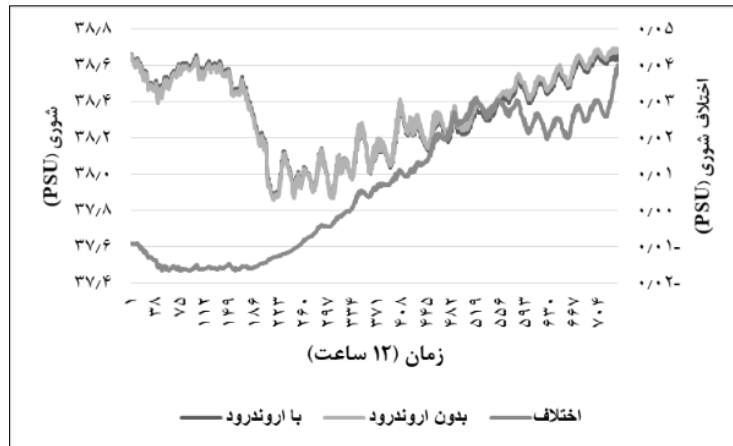
نیمرخ شوری در تنگه هرمز نشان می‌دهد که آب سبک‌تر دریای عمان از لایه سطحی و از سمت سواحل ایرانی وارد خلیج فارس شده و آب شورتر و سنگین‌تر از لایه‌های عمیق از تنگه هرمز خارج شده و وارد دریای عمان می‌شود. حذف اروندرود باعث شده حجم آب شورتر اندکی افزایش یابد. نمودار نشان می‌دهد که دبی اروندرود بر شوری آب ورودی



شکل ۱۲: مقایسه تغییرات ۱۲ ساعته شوری طی یک سال در (الف) حوالی تنگه هرمز، (ب) وسط خلیج فارس و (ج) رأس خلیج فارس



شکل ۱۳: نیمرخ شوری در تنگه هرمز (الف) با در نظر گرفتن اروندرود و (ب) بدون در نظر گرفتن آن



شکل ۱۴: مقایسه تغییرات ۱۲ ساعته شوری طی یک سال در عمق ۵۰ متری تنگه هرمز

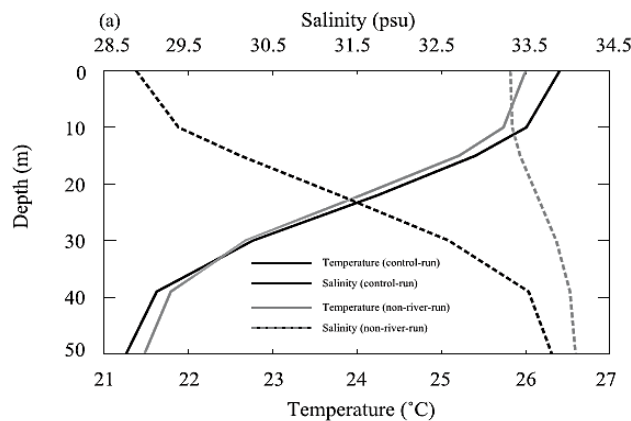
#### ۴. بحث و نتیجه گیری

جهت‌گیری پلوم رودخانه با توجه به گردش کلی خلیج فارس بیشتر متمایل به سواحل عربی است و بنابراین این مناطق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در غیاب جزر و مد انتظار می‌رود جهت‌گیری پلوم رودخانه تحت تأثیر نیروی باد باشد که این مطالعه توسط Pous et al. (2013) انجام شده است و نشان دادند که هنگام وزش باد شمالی یا شمال‌شرقی پلوم رودخانه به سمت سواحل عربی حرکت می‌کند ولی در اثر وزش باد شمال‌غربی، قسمتی از پلوم رودخانه به سمت سواحل ایرانی منحرف می‌شود. ولی با در نظر گرفتن جزر و مد و به دلیل اثرات اتلافی، چرخش پلوم به سمت سواحل عربی است که این نکته در مطالعات Johns et al. (2000) و Pous (2005) تأیید شده است. با حذف اثرات اروندرود، فقط یک جبهه شوری را می‌توان مشاهده کرد که ناحیه داخلی خلیج فارس را تشکیل می‌دهد. درحالی‌که در حالت طبیعی دو جبهه یکی شامل تقابل آب خلیج فارس و دریای عمان و دیگری جبهه اروندرود و خلیج فارس وجود دارند. به‌طور کلی گسترش پلوم شوری رودخانه تحت تأثیر عواملی از جمله دبی رودخانه، جریان‌های اقیانوسی، وزش باد، اختلاط قائم و میزان بارش می‌باشد. در مطالعه‌ای که

در دهانه رودخانه آمازون انجام شد، این نتیجه به دست آمد که کمترین مقادیر شوری هنگامی است که دبی رودخانه بیشتر از مقدار معمول است و در مقابل، زمانی که دبی رودخانه کمتر از حد معمول باشد، مقادیر شوری بزرگ‌تر مشاهده می‌شود. همچنین جریان‌های اقیانوسی از قبیل گردابه‌ها، نیز نقشی کلیدی در توسعه مکانی پلوم شوری با انتقال آب شیرین به فواصل دور از دهانه رودخانه ایفا می‌کنند (Grotsky et al., 2014).  
 علی‌رغم حذف اثر اروندرود، خروج آب شور از خلیج فارس اندکی تقویت شده است و این نشان‌دهنده وابستگی گردش جریان در خلیج فارس و تبادل آب آن با دریای عمان به گرادیان چگالی است (Kampf and Sadrinasab, 2006) که این مورد در مطالعات صورت‌گرفته تأیید شده است. Al-Yamani (2008) بیان می‌کند که یک گرادیان شوری افقی در خلیج فارس وجود دارد به طوری که کمترین مقدار شوری در خور شط‌العرب، خور الزبیر خور عبدالله وجود دارد. روند توزیع مکانی شوری در آب‌های کویت مشهود است و کمترین میانگین شوری در آب‌های شمالی آن به دلیل اثرات آب‌های شیرین شط‌العرب رخ می‌دهد (با شوری  $33/82$  PSU) و میانگین شوری نسبتاً بیشتر در دریاچه کویت و آب‌های جنوبی آن رخ می‌دهد (با شوری  $40/36$  PSU) (Al-Yamani et al., 2004). این

از یک درجه سانتی‌گراد است که این موارد با نتایج مشاهده‌شده در مورد اثرات اروندرود توافق بسیار خوبی دارد (نتایج مطالعه مذکور در شکل ۱۵ قابل مشاهده است). مطالعات انجام‌شده در ارتباط، با اثرات پلوم دمایی رودخانه بر دریا، نشان می‌دهد که ورود آب شیرین رودخانه در نزدیکی سطح یک لایه آمیخته بر روی ترموکلاین ایجاد می‌کند؛ درحالی‌که یک لایه هم‌دمای عمیق‌تر که شامل لایه آمیخته و هم‌چگال است، تشکیل می‌شود (Kako and Nakagawa, 2016)؛ بنابراین، آب با شوری کمتر در نزدیکی سطح نقش مهمی در تعیین عمقی که اثرات آمیختگی محدود هستند، ایفا می‌کند و باعث می‌شود اثرات نیروهای جوی در همان لایه آمیخته سطحی نگه‌داشته شوند و به لایه‌های زیرین نفوذ نکنند (Seo et al., 2009).

مقادیر میانگین بسته به چرخه سالانه میزان ورودی آب شیرین از اروندرود تغییر می‌کنند. پیامدهای اقلیمی اختلاف شوری سطحی که در دو حالت مدنظر با هم مقایسه گردید، در قیاس با دمای سطحی بسیار بیشتر است؛ به عبارتی تغییرات شوری سطحی در بلندمدت اثرات بیشتری نسبت به تغییرات دمای سطحی بر اقلیم حوضه دارد (Foltz and McPhaden, 2008)؛ زیرا تغییرات دمای سطحی با بازخوردهای اندرکنش هوا-دریا می‌تواند مواجه شود ولی در مورد تغییرات شوری چنین نیست. در مطالعه‌ای که توسط Kako et al. (2016) انجام شد، مشاهده شد که اثر پلوم رودخانه به صورتی است که باعث کاهش شوری حدود ۶ PSU در لایه نزدیک سطح و در عمق ۵۰ متری این اختلاف به کمتر از ۰/۵ PSU می‌رسد. درحالی‌که اثر رودخانه بر روی دما از سطح تا بستر کمتر



شکل ۱۵: نیمرخ قائم تغییرات دما و شوری با در نظر گرفتن اثرات رودخانه و بدون در نظر گرفتن اثرات آن (Kako and Nakagawa, 2016)

خارج می‌شود. بر طبق مطالعات صورت‌گرفته، باد و نیروهای شناوری در این گردش نقش دارند. اروندرود بزرگ‌ترین منبع آب شیرین خلیج فارس است که نقش عمده‌ای در تعادل گردش و شوری خلیج فارس به‌خصوص در نواحی شمالی آن و سواحل خوزستان دارد. در مورد مقدار دقیق دبی اروندرود مطالعه دقیقی طی

در این مطالعه، اثر اروندرود بر شوری خلیج فارس با استفاده از مدل مایک ۳ بررسی گردید و توزیع شوری در حضور و غیاب این منبع آب شیرین مقایسه شد. گردش کلی خلیج فارس پادساعتگرد است و آب سبک از سمت سواحل ایرانی وارد خلیج فارس شده و پس از گردش کامل سنگین شده و از سمت سواحل عربی از خلیج فارس

خلیج فارس، تا شعاع ۵۰ کیلومتری از دهانه محسوس است و این شعاع بسته به جهت‌گیری پلوم می‌تواند سواحل خوزستان یا سواحل عربی را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین کاهش دبی اروندرود می‌تواند این نواحی را تحت تأثیر قرار دهد و فعالیت‌های مربوط به صنعت آبی پروری و کشاورزی نواحی جنوب استان خوزستان را مختل سازد. همچنین نتایج نشان داد که حذف اروندرود در مدلسازی تأثیر چندانی بر روی گردش خلیج فارس ندارد و شوری آب ورودی و خروجی از خلیج فارس به دریای عمان، دستخوش تغییر چندانی نمی‌شود.

مدلسازی شوری در خلیج فارس، وابستگی زیادی به تبخیر دارد؛ از سویی، تبخیر به‌عنوان یک پارامتر ورودی به مدل معرفی شده است. طبق بررسی‌هایی که به عمل آمد، اختلافاتی بین مقادیر تبخیر ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی جزیره‌های داخل خلیج فارس و خروجی مدل ECMWF و همچنین مطالعات صورت گرفته قبلی مشاهده شد. در پایان پیشنهاد می‌شود به منظور به یک مدل دقیق‌تر، اثرات تبخیر بر خلیج فارس مورد بررسی قرار گیرد و نتایج آن با مقادیر میدانی شوری در کل خلیج فارس مقایسه شود تا بتوان به یک مدل دقیق‌تر دست یافت.

### References:

- Abdolkhanian, N., Elmizade, 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*, 19(4): 13-24.
- Al-Yamani, F. 2008. Importance of the freshwater influx from the Shatt-Al-Arab River on the Gulf marine environment, In: Abuzinada A.H., Barth HJ., Krupp F., Böer B., Al Abdessalaam T.Z. (eds) *Protecting the Gulf's Marine Ecosystems from Pollution*. Birkhäuser Basel.
- Al-Yamani, F.Y., Bishop, J.M., Ramadhan, E., Al-Husaini, M. and Al-Ghadban, A. 2004. *Oceanographic atlas of Kuwait's waters*. 202 pp. Kuwait Institute for Scientific Research (Publisher).

سال‌های اخیر صورت نگرفته است ولی منابعی محدود پیرامون سرچشمه‌های آن نشان می‌دهد که برای مثال دبی رودخانه دجله طی ۴۰ سال اخیر تا حدود ۷۵٪ کاهش یافته است (Yaseen et al., 2016). آنچه واضح است با کاهش شدت بارش‌ها و همچنین دخالت عوامل انسانی همچون انتقال آب از سرچشمه‌های آن و احداث سدهای متعدد در مسیر رودخانه‌های منتهی به اروندرود، دبی آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که این امر منجر به نفوذ آب شور خلیج فارس به داخل آن شده است. برای کنترل نفوذ شوری پیشنهاد شده است که تا فاصله سه کیلومتری از دهانه آن عمق آب به کمتر از ۴ متر کاهش یابد و البته ذکر شده است که در دبی‌های کمتر از ۲۶۰ متر مکعب بر ثانیه، روش‌های کنترل شوری چندین مؤثر نیستند (Etemad Shahidi et al., 2011). با این وجود کاهش عمق دهانه چندین منطقی به نظر نمی‌رسد زیرا علاوه بر اینکه آورد رسوب رودخانه خود رقم بالایی است، اروندرود تنها رودخانه قابل کشتی‌رانی کشور است که نقش مهمی در اقتصاد و تجارت کشور دارد. همچنین همواره بحث لایروبی و تعیین مرز بین ایران و عراق که در گرو تغییر عمق اروندرود است، محل مناقشه بین دو کشور بوده است. اثر اروندرود بر شوری

- Etemad Shahidi, A. F., Saburi, A.A. and Parsa, J. 2011. Control of Salinity Intrusion in Arvand Estuary under Different Hydrological Conditions, *Iran-water resources research*, 7(2): 50-60.
- Foltz, G. R. and McPhaden, M. J. 2008. Seasonal mixed layer salinity balance of the tropical North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 113, C02013.
- Grodsky, S.A., Reverdin, G., Carton, J.A. and Coles, V.J. 2014. Year-to-year salinity changes in the Amazon plume: Contrasting 2011 and 2012 Aquarius/SACD and SMOS satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 140, 14-22.
- Johns, W.E., Jacobs, G.A. and Kindle, S.P. 2000. Murray and M. Carron, *Arabian Marginal Seas and Gulfs*, University of Miami, Miami.

- Kako, S., Nakagawa, T., Takayama, K., Hirose, N. and Isobe, A. 2016. Impact of Changjiang River Discharge on Sea Surface Temperature in the East China Sea, American Meteorological Society. 46: 1735-1750.
- Kampf, J., and Sadrinasab, M. 2006. The circulation of the Persian Gulf: A numerical study. Ocean Science. 2: 1–15.
- Pous, S. 2005. Dynamique Océanique dans les Golfes Persiques et d'Oman. PhD Thesis. University of Western Bretagne, Brest.
- Pous, S., Carton, X. J. and Lazure, P. 2013. A process study of the wind-induced circulation in the Persian Gulf. Open Journal of Marine Science. 3(1): 1–11.
- Pous, S., Lazre, P. and Carton, X. 2015. A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. Continental Shelf Research. 94: 55–70.
- 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.
- Sadrinasab, M., Akbarinasab, M. and Najarpour, M. A. 2019. Modelling of Arvandrud River Plume and the impact of wind and River Discharge on the plume structure By Three Dimensional and Hydrodynamical Model (FVCOM), Journal of marine science and technology. e- published: DOI: 10.22113/JMST.2019.122183.2135.
- Saleh, D. 2010. Stream gage descriptions and streamflow statistics for sites in the Tigris River and Euphrates River basins, Iraq, U.S. Geological Survey Data Series. 540: 146 pp.
- Seo, H., Xie, S. P., Murtugudde, R., Jochum, M. and Miller, A.J. 2009. Seasonal Effects of Indian Ocean freshwater forcing in a regional coupled model, Journal of Climate. 22(24): 6577–6596.
- Tilburg, C. E., Jordan, L. M., Carlson, A. E., Zeeman, S.I., and Yund, P. O. 2015. The effects of precipitation, river discharge, land use and coastal circulation on water quality in coastal Maine Royal Society open science. 2(7): p 140429.
- Varsamos, S., Nebel, C., and Charmantier, G. 2005. Ontogeny of osmoregulation in postembryonic fish: a review, Comparative Biochemistry and Physiology. Part A. 141:401-429.
- Xue, P. and Eltahir, E. A. B. 2015. Estimation of the Heat and Water Budgets of the Persian Gulf Using a Regional Climate Model. American Meteorological Society. 28: 5041-5062.
- Yaseen, B. R., Al-Asaady, K. A., Kazem, A. A. and Chaichan, M. T. 2016. Environmental Impacts of Salt Tide in Shatt Al-Arab-Basra/Iraq. Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology. 10:1 Ver. II, 35-4.



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

Original Article



## The study of the effect of Arvandroud on Persian Gulf Salinity change using MIKE model

Omid Mahpeykar <sup>1\*</sup>, Mohammadreza Khalilabadi <sup>2</sup>, Karim Kenarkoobi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Marine Physics, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran.

<sup>2</sup> Department of Marine Physics, University of Marine Air Science and Technology Complex, Malek Ashtar University of Technology, Shiraz, Iran.

\*Corresponding Author E-mail: [Omidd8@gmail.com](mailto:Omidd8@gmail.com)

**Received:** 14 November 2018

**Accepted:** 12 May 2019

DOI: [10.22113/JMST.2019.156240.2224](https://doi.org/10.22113/JMST.2019.156240.2224)

### Abstract

ArvandRoud is known as the most important fresh water inlet of the Persian Gulf and plays a key role in controlling salinity, especially in its northern portion. Since the northern part of the Persian Gulf is exchanged with lagoons and wetlands due to tide, its salinity is of great importance to the ecosystem of the region and the coasts of Khuzestan. In this study, using the Mike model based on the three-dimensional solution of the Navier Stokes equations, assumption of incompressibility, Boussinesq approximation, and hydrostatic pressure, the effect of Arvandroud on Persian Gulf salinity in two states has been investigated: with a discharge rate of 1400 m<sup>3</sup>/s and without Arvandroud. The results show that by ignoring the entrance of the Arvandroud to the Persian Gulf, the peak of salinity at the Gulf increases to 7 PSU and affects the southern half of the Persian Gulf along the Arabian coasts. Also, results implicitly indicate that Arvandroud discharge rate has no effect on the amount of water entering and leaving the Strait of Hormuz.

**Keywords:** Persian Gulf, Modelling, MIKE 3, salinity, Arvandroud.

**List of Table and Figures**

- Figure 1:** used network in model  
**Figure 2:** monthly average of salinity over the last three years  
**Figure 3:** location of check points for current and salinity comparison  
**Figure 4:** comparison of current speed to measurement data  
**Figure 5:** comparison of current direction to measurement data  
**Figure 6:** comparison of surface salinity to measurement data of Reynolds in summer and winter  
**Figure 7:** the saline plume at the mouth of Arvandroud in summer and winter  
**Figure 8:** distribution of surface salinity in summer with and without Arvandroud  
**Figure 9:** distribution of bottom salinity in summer with and without Arvandroud  
**Figure 10:** distribution of surface salinity in winter with and without Arvandroud  
**Figure 11:** distribution of bottom salinity in winter with and without Arvandroud  
**Figure 12:** Annual salinity differences comparison around the Strait of Hormuz, center of Persian Gulf and northern part of Persian Gulf  
**Figure 13:** Vertical profile of salinity in the Strait of Hormuz with and without Arvandroud  
**Figure 14:** Annual salinity differences comparison in bottom the Strait of Hormuz  
**Figure 15:** Vertical profiles of temperature and salinity near the Changjiang River mouth (308N, 1238E) in August.