

اندازه‌گیری‌های میدانی جریان و پارامترهای فیزیکی آب دریا و مدل‌سازی عددی پساب فوق‌شور آب‌شیرین‌کن در ساحل جنوب‌شرقی جزیره کیش

صادق یاری^۱، سیدطالب حسینی^۲، حسین فرجامی^{۳*}

۱- شرکت مهندسی RASTECH GmbH هایدلبرگ، آلمان، پست الکترونیکی: yari.sadegh@gmail.com

۲- پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پست الکترونیکی: sthosseini@inio.ac.ir

۳- پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پست الکترونیکی: h.farjami@inio.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۱

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۸

چکیده

این مطالعه داده‌های میدانی دما، شوری، تراز آب و جریان در محدوده‌ی خروجی پساب آب‌شیرین‌کن جنوب‌شرقی جزیره کیش را بررسی می‌کند. جریان دیده‌بانی عمدتاً با جریان کشندی در راستای شرقی-غربی تغییر می‌یابد. جریان باقیمانده موجب انحراف جزیری جنوب‌سوی جریان دیده‌بانی می‌گردد. برای تعیین مکان تخلیه پساب فوق‌شور، سه شبیه‌سازی با مدل MIKE 21 FM و فرض‌های محل تخلیه در عمق‌های ۱، ۳ و ۶ متر انجام شد. نتایج نشان داد شوری آب دریای تحت اثر پساب و نوسانات کشندی حدود ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند. بیشینه اثر پساب روی دریا در دوره‌ی که کشند، روی می‌دهد. پساب به شکل عمده به موازات خط ساحلی تحت اثر جریان‌های کشندی پخش می‌شود و فاصله ۸۰۰ متر از خط ساحلی (عمق ۳ متر)، بهترین مکان تخلیه‌ی پساب است. همچنین نرم‌افزار توسعه‌یافته توسط Jirka (۲۰۰۸) نشان داد که زاویه‌ی ۴۵ درجه بین لوله‌ی پساب با بستر و پخش‌کننده‌ی ۵ خروجی در محل تخلیه، بهترین نحوه‌ی خروجی پساب است.

کلمات کلیدی: تحلیل هارمونیک، جریان کشندی، آب‌شیرین‌کن، پساب شور، خلیج فارس.

۱. مقدمه

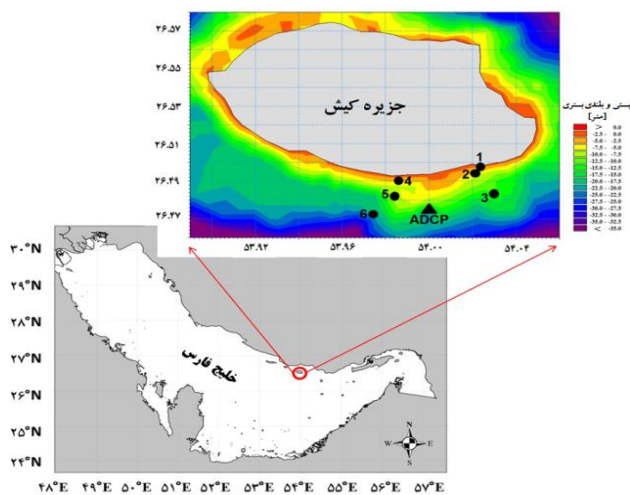
تغلیظ آن در نزدیکی بستر دریا می‌گردد که می‌تواند مستعد تخریب اکوسیستم آن منطقه شود. در حالت کلی، میزان حجم پساب خروجی، محل تخلیه، چگالی و غلظت پساب‌ها، شرایط محیطی دریا مانند شدت جریان‌های منطقه و میزان آمیختگی پساب با آب دریا در مقدار و نحوه‌ی پخش یا تجمع این پساب‌ها اثرگذار است. با هدف کمینه کردن اثرات سوء زیست‌محیطی ناشی از آلودگی پساب آب‌شیرین‌کن‌ها، بررسی نحوه پخش و تعیین مکان بهینه‌ی تخلیه آن از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً برای پخش سریعتر پساب و آمیختگی بهتر آن با آب

یکی از مسائل زیست‌محیطی مربوط به آب‌شیرین‌کن‌ها و به‌ویژه آب‌شیرین‌کن‌های با روش اسمز معکوس در مناطق ساحلی، تخلیه‌ی پساب فوق‌شور آن به محیط دریا است. آب‌شیرین‌کن‌های با روش اسمز معکوس، پس‌آبی هم‌دما با آب دریای پیرامونی ولی شورتر از آن تولید می‌کنند. افزایش شوری به تنهایی باعث افزایش چگالی آب می‌شود. در حالت ایستا (بدون در نظر گرفتن جریان و موج) این افزایش چگالی باعث پایین رفتن پساب و

مدل‌سازی سه بعدی پراکندگی پساب آب شیرین‌کن واقع در شمال جزیره قشم، توسط Memari and Siadatmousavi (2018)، با مدل FVCOM، انجام شد. این آب شیرین‌کن با روش تقطیر کار می‌کند و پساب آن گرم‌تر و شورتر از آب دریای مجاور است. آن‌ها نشان دادند که پخش آلودگی فوق‌شوری این پساب نسبت به آلودگی گرمایی آن از اهمیت کمتری برخوردار است و پساب به‌علت داشتن چگالی کمتر نسبت به دریا، تمایل دارد به لایه‌ی بالاتر ستون آب حرکت کند. از این رو تخلیه‌ی پساب در عمق ۱۰ متری دریا، اثرات منفی این پساب داغ را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی احداث آب شیرین‌کن (با سیستم اسمز معکوس) در جنوب شرق جزیره کیش، دیده‌بانی‌های میدانی پارامترهای فیزیکی و جریان‌های دریایی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس با انجام شبیه‌سازی‌های عددی جریان و پخش فوق‌شوری پساب آب شیرین‌کن، راهکارهای لازم جهت کاهش اثرات منفی ناشی از تخلیه‌ی آلودگی پساب ارائه می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری تراز آب و پروفایل جریان (ADCP) و ۶ ایستگاه اندازه‌گیری پارامترهای دما و شوری (CT) روی شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین مختصات جغرافیایی و عمق‌های این ایستگاه‌ها در جدول شماره (۱) ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جزیره کیش در خلیج فارس و ایستگاه‌های اندازه‌گیری پروفایل دما و شوری (نقاط ۱ تا ۶) و پروفایل جریان و تراز آب (مثلث سیاه رنگ) در بخش جنوب شرقی جزیره کیش در آب‌های پیرامون آب شیرین‌کن

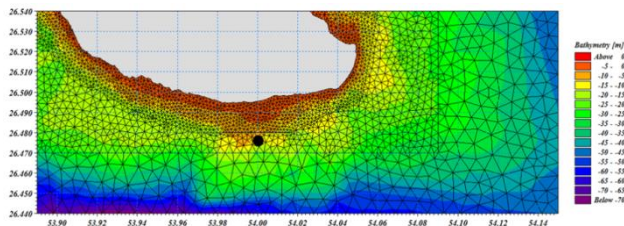
محیط دریایی به‌منظور کمینه کردن اثرات منفی آن روی اکوسیستم دریایی از سیستم پخش‌کننده، به‌ویژه پخش‌کننده‌ی چندخروجی، در محل تخلیه پساب استفاده می‌شود. همچنین برای بازدهی بهتر یک نیروگاه آب شیرین‌کن، لازم است مکان‌های آب‌گیر^۲ و تخلیه^۳ آن نیروگاه، به‌طور مناسبی، تحت شرایط حاکم موجود در سایت تعیین شوند تا بازچرخش^۴ آب شور در محل آب‌گیر کمینه شود. به‌منظور اجتناب از رخداد این بازچرخش، شوری محدودکننده در آب‌گیر به‌اندازه‌ی 0.1 واحد شوری، بیشتر از شوری دریای مجاور در نظر گرفته می‌شود (Patel et al., 2016). بنابراین در پروژه‌های طراحی و ساخت آب شیرین‌کن‌های مختلف با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی عددی، پراکندگی و پخش پساب فوق‌شور مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد تا مناسب بودن مکان‌های آب‌گیری و تخلیه‌ی آب شیرین‌کن تأیید شود. برای مثال، در مطالعه‌ی Sun et al., (2012)، با استفاده از مدل اقیانوسی و ساحلی FVCOM^۵ نحوه‌ی پخش پساب ناشی از یک آب شیرین‌کن با سیستم اسمز معکوس در تنگه‌ی کره^۶ مورد بررسی قرار گرفت تا بهترین مکان تخلیه‌ی پساب، بر اساس رخداد کمترین اثر روی گیاهان دریایی تعیین شود.

(Al-Najjar (2015)، نحوه پخش و چگونگی خروج پساب آب شیرین‌کن با سیستم اسمز معکوس را در غزه (ساحل دریای مدیترانه) با مدل CORMIX^۷ در فواصل، عمق‌ها و با پخش‌کننده‌های مختلف بررسی کرد. نتایج این مدل نشان داد که تخلیه‌ی پساب با پخش‌کننده‌ی چندخروجی در فراساحل در یک عمق برابر ۹/۵ متر، طراحی عملی (بازدهی بهینه) و زیست‌محیطی مطلوب را فراهم می‌سازد.

همچنین Patel et al., (2016)، با استفاده از مدل MIKE 21 روی ساحل شرقی هند (سواحل خلیج بنگال، شهر چنای^۸) نتیجه گرفتند که سایت‌های تخلیه‌ی پساب با جریان‌های خروجی کاملاً قوی، قابلیت فرارفت بالا و آمیختگی شدید با آب دریای مجاور را دارند و همچنین سایت‌های با فاصله‌ی بهینه از خط ساحلی، برای مکان تخلیه‌ی پساب در اولویت انتخاب هستند.

- 1 diffuser
- 2 intake
- 3 outfall
- 4 recirculation
- 5 Finite Volume Coastal Ocean Model
- 6 Korea Strait
- 7 Cornell Mixing Zone Expert System
- 8 Chennai

استفاده می‌کند. این معادلات در راهنمای استفاده مدل به تفصیل ارائه شده‌اند (DHI, 2014). این مدل برای حل معادلات مذکور از مش بندی مثلثی نامنظم (unstructured)، استفاده می‌کند. در این برنامه، حل به شیوه‌ی عددی و با استفاده از روش حجم محدود صورت می‌گیرد. در این مطالعه، مدل هماهنگ با مدت و گام زمانی اندازه‌گیری‌های دستگاه ADCP، از تاریخ ۵ فوریه ۲۰۱۶ (۱۳۹۴/۱۱/۱۶) ساعت ۱۲:۴۰ تا ۱۰ مارس ۲۰۱۶ (۱۳۹۴/۱۲/۲۰) ساعت ۰۸:۲۰ با گام ۲۰ دقیقه اجرا شد. از آنجا که کشند در منطقه‌ی مورد مطالعه، نیروی غالب است، در مرزهای باز مدل ترازهای کشندی حاصل از داده‌های مدل کشندی جهانی^۱ در مدول MIKE 21 Toolbox به‌کار گرفته شد. همچنین در این مرزها، دما و شوری برابر با میانگین اندازه‌گیری‌های دما و شوری در ۶ ایستگاه اندازه‌گیری (در شکل ۱ و جدول ۱، موقعیت این ایستگاه‌ها را ببینید)، به‌ترتیب برابر با ۲۴/۴۶ درجه ساتیگراد و ۳۸/۹۲ واحد شوری در نظر گرفته شد. شبکه‌ی محاسباتی این مدل شامل ۲۲۱۱ گره^۲ و ۴۱۳۶ سلول مثلثی^۳ است و از ۵۳/۸۹ درجه شرقی تا ۵۴/۱۵ درجه شرقی و از ۲۶/۴۴ درجه شمالی تا ۲۶/۵۴ درجه شمالی (شکل ۲)، گسترده شده است.



شکل ۲: شبکه‌ی محاسباتی مدل MIKE 21 FM در منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه ADCP

فاصله‌ی بین گره‌ها از حدود ۲۵۰ متر و کمتر در مناطق کم-عمق ساحلی تا بیشینه ۱۰۰۰ متر در مناطق فراساحلی متغیر است. بیشینه عمق منطقه‌ی محاسباتی در مرز فراساحلی جنوب غربی مدل با عمق حدود ۷۵ متر قرار گرفته است (شکل ۲). به‌منظور اعتبارسنجی^۴ مدل، داده‌های میدانی جریان و تراز کشندی در ایستگاه ADCP با خروجی‌های متناظر مدل، در دو مرحله‌ی واسنجی^۵ و راستی‌آزمایی^۶، مورد مقایسه قرار گرفتند. موقعیت این

1 Global Tide Model data
2 nodes
3 elements
4 Validation
5 calibration
6 Verification

این پروفایل‌های دما و شوری آب در شش ایستگاه (جدول ۱) در تاریخ ۱۳۹۴/۹/۲۱ با یک عدد دستگاه (Conductivity Temperature Sensor 3211) محصول شرکت AANDERAA نورژ اندازه‌گیری شدند. گام زمانی این اندازه‌گیری‌ها ۱ ثانیه بود. همچنین در این مطالعه، داده‌های تراز سطح آب و پروفایل سرعت جریان ثبت شده در سه ارتفاع ۴/۴ متر (نزدیک بستر)، ۶/۴ متر (عمق میانی) و ۸/۴ متر (نزدیک سطح) بالای بستر توسط یک عدد دستگاه (ADCP) Acoustic Doppler Current Profiler بستر نشین (نصب شده روی بستر دریا) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این داده‌ها از تاریخ ۵ فوریه ۲۰۱۶ (۱۳۹۴/۱۱/۱۶) ساعت ۱۲:۴۰ تا ۱۰ مارس ۲۰۱۶ (۱۳۹۴/۱۲/۲۰) ساعت ۰۸:۲۰ با گام ۲۰ دقیقه ثبت شدند.

جدول ۱: مختصات جغرافیایی و عمق ایستگاه‌های اندازه‌گیری

ایستگاه	عمق (m)	عرض جغرافیایی (N)	طول جغرافیایی (E)
ADCP	۱۲	۲۶/۴۷۵۱۹۴	۵۴/۰۰۰۰۰۰
CT1	۵	۲۶/۴۹۸۴۱۷	۵۴/۰۲۳۶۳۹
CT2	۱۰	۲۶/۴۹۶۴۱۷	۵۴/۰۲۳۴۴۴
CT3	۱۶	۲۶/۴۸۳۵۸۳	۵۴/۰۲۹۶۹۴
CT4	۶	۲۶/۴۹۰۹۴۴	۵۳/۹۸۲۸۰۶
CT5	۱۱	۲۶/۴۸۱۳۰۶	۵۳/۹۸۱۷۵۰
CT6	۱۵	۲۶/۴۷۶۶۹۴	۵۳/۹۷۶۷۵۰

جریان‌های دریایی اندازه‌گیری شده، ترکیبی از مؤلفه‌های مختلف هستند. مهمترین مؤلفه‌های تشکیل دهنده این جریان‌ها عبارتند از: جریان زمینه (Background)، جریان کشندی و جریان ناشی از باد. با اجرای تحلیل هارمونیک (Pawlowicz et al., 2002)، مؤلفه‌های کشندی محاسبه شده و مؤلفه‌های غالب آن‌ها مشخص می‌شوند. همچنین سیگنال‌های کشندی از سیگنال‌های غیرکشندی، تفکیک می‌شوند. یعنی با محاسبه سهم جریان‌های کشندی، جریان باقیمانده (Residual) که ترکیب جریان ناشی از باد و جریان زمینه است، مشخص خواهد شد.

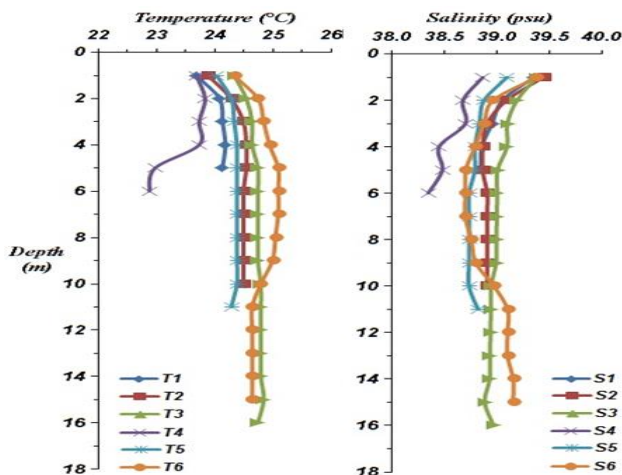
با استفاده از مدل عددی MIKE 21 FM که توسط موسسه هیدرولیک دانمارک (DHI) توسعه یافته است، وضعیت کشند و جریان‌های دریایی و نیز نحوه‌ی پخش آلودگی فوق‌شوری ناشی از پساب اسمز معکوس نیروگاه آب‌شیرین کن کیش در این منطقه شبیه‌سازی می‌شوند. به دلیل کمی عمق آب در این منطقه، از این مدل دو بعدی استفاده می‌شود. این مدل، از معادلات دو بعدی افقی جریان آب کم عمق شامل یک معادله پیوستگی و دو معادله بقای اندازه حرکت در دو بعد افقی و نیز معادلات دما و شوری

بعد از اعتبارسنجی کمی و کیفی نتایج مدل، محل خروجی پساب به صورت منبع آلاینده‌ی فوق‌شوری در فواصل مختلف از خط ساحلی، در قالب مدل‌سازی‌های متفاوت، مورد مطالعه قرار گرفت. در این مدل‌سازی‌ها، فرض شد سیستم اسمز معکوس آب شیرین‌کن آب دریای محیط را، طبق اسناد موجود، بدون تغییر دما بین ۳۰ درصد تا بیشینه‌ی ۴۵ درصد شورتر می‌کند. در مدل با فرض دریای با شوری ۳۸/۹۲، شوری پساب آب شیرین‌کن (با فرض افزایش به میزان بحرانی ۴۵ درصد) برابر مقدار بیشینه‌ی ۵۶/۴۳ واحد شوری انتخاب شد. با توجه به اینکه مهمترین قید زیست محیطی، افزایش شوری در فاصله ۲۰۰ متری از محل تخلیه‌ی پساب به میزان حداکثر ۱۰ درصد شوری آب محیط می‌باشد، بنابراین در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از خروجی پساب، شوری باید کمتر از ۴۲/۸۱۲ واحد شوری باشد. همچنین در مدل، دمای پساب و آب دریا هر دو برابر با در ۲۴/۴۶ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شدند. دبی خروجی این پساب، طبق اسناد موجود، برابر ۰/۱۲ m³/s (۴۴۰ مترمکعب بر ساعت) می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱ دیده‌بانی پارامترهای فیزیکی

با توجه به زمان اندازه‌گیری‌ها که اواخر پاییز بوده و همچنین بیشینه عمق ایستگاه‌های مورد مطالعه (۱۶ متر)، لایه بندی آب در این منطقه وجود ندارد و پروفایل‌های قائم شوری و دما نشان دهنده آمیختگی در ستون آب هستند (شکل ۳).



شکل ۳: پروفیل‌های قائم اندازه‌گیری شده دما و شوری آب. اندیس‌های ۱ تا ۶ نشانگر شماره ایستگاه هستند.

ایستگاه در شبکه‌ی محاسباتی مدل در شکل (۲) نشان داده شده است. نصف اول بازه زمانی اجرای مدل (حدود ۱۷ روز از ۵ فوریه ۲۰۱۶ ساعت ۱۲:۴۰ تا ۲۲ فوریه ۲۰۱۶ ساعت ۱۰:۲۰، معادل ۱۲۱۸ داده) به دوره‌ی واسنجی و نیمه‌ی دوم این بازه زمانی (حدود ۱۷ روز از ۲۲ فوریه ۲۰۱۶ ساعت ۱۰:۴۰ تا ۱۰ مارس ۲۰۱۶ ساعت ۰۸:۲۰ معادل ۱۲۱۸ داده) به دوره‌ی راستی-آزمایی مدل اختصاص یافت.

مدل با تعیین ضریب مناسب اصطکاک بستری در مقایسه‌ی نتایج تراز و جریان غالب کشندی مدل با داده‌های اندازه‌گیری کشند و جریان متناظر لایه‌ی میانی در حدود ۱۷ روز اول اندازه-گیری‌ها واسنجی شد و سپس همین ضریب برای دوره‌ی راستی-آزمایی (۱۷ روز آخر اندازه‌گیری‌های جریان) مورد استفاده قرار گرفت تا اعتبارسنجی یا صحت عملکرد مدل مورد تأیید قرار گیرد. این ضریب مناسب معرف اصطکاک بستری مدل، برابر با ضریب مانینگ $25 \frac{m^{1/3}}{s}$ انتخاب شد.

برای مقایسه‌ی کمی نتایج مدل با اندازه‌گیری‌ها از پارامترهای مهارت مدل^۱ (Warner et al., 2005; Hetzel et al., 2015)، و خطای استاندارد^۲ (SE) استفاده شد. این پارامترها، به ترتیب با معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شوند:

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - O_i|^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1) \text{ معادله}$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left[\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right]} \quad (2) \text{ معادله}$$

در این معادلات، N تعداد داده‌ها، O_i داده‌های دیده‌بانی و M_i داده‌های مدل هستند که می‌تواند تراز کشندی یا اندازه سرعت جریان کشندی باشد و علامت بار (̄) بیانگر میانگین زمانی این پارامترها است. مهارت مدل بین صفر و ۱ به ترتیب برای شرایط عدم انطباق و انطباق کامل بین نتایج مدل و دیده‌بانی‌ها تغییر می‌کند. همچنین هرچه پارامتر معرف خطای مدل (SE) به صفر نزدیک‌تر باشد، تطابق نتایج مدل با واقعیت بیشتر است. در این مطالعه، هر دو پارامتر آماری مذکور، به‌طور جداگانه برای هر یک از مراحل واسنجی و راستی‌آزمایی محاسبه می‌شود.

¹ Model Skill

² Standard Error

براساس تحلیل هارمونیک، دامنه‌ی تراز آب (بر حسب سانتیمتر) و فاز (بر حسب درجه) چهار مؤلفه‌ی اصلی کشندی K_1 ، O_1 ، M_2 و S_2 و قوی‌ترین مؤلفه‌های آب کم عمق (برکشند^۵ و مرکب^۶) در جدول (۲)، نشان داده شده است.

طبق جدول (۲)، مؤلفه‌ی M_2 با دامنه‌ی حدود ۳۳ سانتیمتر، به‌عنوان قوی‌ترین مؤلفه‌ی کشندی محل شناخته می‌شود.

همچنین عدد شکل کشندی $(F = \frac{a_{K1} + a_{O1}}{a_{M2} + a_{S2}})$ ، با مقدار برابر ۰/۳۸ بیانگر رژیم کشندی آمیخته عمدتاً نیم‌روزانه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (National Ocean Service, 2000).

جدول ۲: دامنه و فاز چهار مؤلفه اصلی کشندی (K_1 ، O_1 ، M_2 و S_2) و قوی‌ترین مؤلفه‌های برکشند (M_4) و مرکب (MS_4)

	M_2	S_2	O_1	K_1	M_4	MS_4
a (cm)	۳۲/۷	۱۳/۵	۳/۹	۵/۵	۱/۵	۱/۶
Pha (deg)	۱۸۸/۲۷	۲۳۷/۳۴	۳۲۲/۲۶	۳۲۲/۰۵	۲۵۸/۶۹	۳۱۲/۲۵

براساس این تحلیل، جریان کشندی و جریان باقیمانده‌ی لایه‌ی میانی در شکل (۵)، به‌طور مجزا، نشان داده شده‌اند. مقایسه‌ی نظیر به نظیر خط‌های آبی (جریان دیده‌بانی) و قرمز (جریان کشندی) در شکل‌های (a.۵) و (b.۵) نشان می‌دهد که اندازه مؤلفه‌ی شرقی-غربی (u) جریان دیده‌بانی و کشندی چندین برابر مؤلفه‌ی متناظر شمالی-جنوبی (v) است. همچنین مؤلفه‌ی u جریان دیده‌بانی شده (نمودار آبی در شکل ۵ (الف))، تحت اثر کشند، همبستگی چشم‌گیری با مؤلفه‌ی u جریان کشندی (نمودار قرمز در شکل ۵ (الف)) دارد در حالی که مؤلفه‌ی v جریان دیده‌بانی شده (نمودار آبی در شکل ۵ (ب))، عمدتاً تحت اثر عوامل ایجادکننده‌ی جریان باقیمانده (نمودار سبز در شکل ۵ (ب)) قرار گرفته است، به‌طوری‌که نمودارهای سری زمانی این دو جریان عمدتاً با مقادیر ضعیف منفی بر هم منطبق شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان گفت در منطقه‌ی مورد مطالعه، در مدت اندازه‌گیری‌های ۳۵ روزه، جریان کشندی، به‌عنوان جریان غالب منطقه، منجر به جریان دیده‌بانی رفت و برگشتی تقریباً خطی در راستای شرقی- غربی می‌شود درحالی‌که اثر ناچیز جریان باقیمانده‌ی محلی (ترکیب جریان ناشی از باد و جریان زمینه)، موجب انحراف جزئی جریان دیده‌بانی به سمت جنوب می‌شود. به‌علاوه، چنانکه در شکل (۵) (الف) مشاهده می‌شود، سرعت‌های غرب‌سو اندکی قوی‌تر

دما و شوری در همه‌ی ایستگاه‌های اندازه‌گیری به‌ترتیب بین ۲۲/۸۸ تا ۲۵/۱ درجه سانتیگراد و ۳۸/۳۵ تا ۳۹/۴۵ واحد شوری تغییر می‌کنند.

۲-۳ دیده‌بانی‌های جریان و تراز

در منطقه‌ی مورد مطالعه، نمودارهای سری زمانی اندازه و جهت جریان نشان دهنده یک روند تناوبی عمدتاً تحت اثر کشند است (شکل ۴). تغییرات زمانی اندازه‌ی سرعت جریان (شکل-های ۴ (الف)، ۴ (ب) و ۴ (ج))، دو دوره که کشند^۱ و سه دوره مه‌کشند^۲ را به‌خوبی نشان می‌دهد. طبق شکل، بیشینه سرعت اندازه‌گیری شده ۸۱ سانتیمتر بر ثانیه است. با توجه به غالب بودن جریان کشندی در راستای قائم، از نزدیک سطح (شکل ۴ (الف) و شکل ۴ (د)) تا نزدیک بستر (شکل ۴ (ج) و ۴ (ی))، و عمق کم ایستگاه اندازه‌گیری (حدود ۱۲ متر)، و نیز زمان اندازه‌گیری‌ها که در فصل سرد (زمستان) ثبت شده‌اند، می‌توان انتظار داشت ستون آب کاملاً آمیخته است. تغییرات جهت جریان (شکل‌های ۴ (د)، ۴ (و) و ۴ (ی))، نشان دهنده یک روند تقریباً خطی است. بیضی جریان در امتداد شرقی- غربی کشیده شده و جریان عمدتاً در این امتداد بصورت خطی رفت و برگشت دارد. جهت جریان‌های عمدتاً کشندی به‌هنگام فروکشند (جزر)^۳ در امتداد ۱۰۰ درجه (شرق‌سوی مایل به جنوب شرقی)، است و به‌هنگام فراکشند (مد)^۴، جریان‌های ۲۶۰ درجه (غرب‌سوی مایل به جنوب غربی)، جریان غالب می‌باشند. به‌عبارت دیگر، به علت شکل هندسی محلی و تغییرات محلی عمق آب ناشی از جزیره‌ی کیش، این جریان‌ها برای چرخش به دور جزیره (حرکت به موازات خط ساحلی) در یک مسیر عمدتاً رفت و برگشتی بایستی در ایستگاه ADCP کمی به سمت جنوب متمایل باشند.

در بخش نتایج مدل (بخش ۳-۴)، الگوی جریان در زمان‌های فراکشند و فروکشند، این مهم را تصدیق می‌کند. همچنین، در دو لایه‌ی بالای بستر (شکل‌های ۴ (و) و ۴ (ی))، خطی بودن جریان‌ها کاملاً مشهود است، ولی در لایه‌ی بالایی یعنی لایه نزدیک سطح (شکل ۴ (د)) قدری پراکنش جریان، تحت اثر نیروهای جوی، مشاهده می‌شود.

¹ Neap
² Spring
³ Low tide
⁴ High tide

⁵ Overtide
⁶ Compound tide

اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADCP در لایه میانی، برای هر دو دوره واسنجی و راستی‌آزمایی تأیید می‌شود. اگرچه تراز کشندی و اندازه سرعت جریان مدل‌سازی شده به ترتیب کمی بیشتر و اندکی کمتر از دیده‌بانی‌های متناظر هستند.

۳-۴ مدل‌سازی میدان جریان و پخش فوق‌شوری

پس از اعتبارسنجی مدل و تأیید صحت عملکرد مدل، الگوی میدان جریان محلی و نحوه پخش فوق‌شوری ناشی از پساب آب‌شیرین‌کن، در این بخش، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۷)، الگوی جریان‌های کشندی فروکشی^۵ (شکل ۷(الف)) و سیلابی^۶ (شکل ۷(ب)) را در محدوده جنوبی جزیره کیش نشان می‌دهد. جریان سیلابی (جریان به‌هنگام فراکشند)، هماهنگ با جریان کشندی ورودی از دریای عمان به خلیج فارس، عمدتاً غرب سو هستند و برعکس جریان فروکشی (جریان به‌هنگام فروکشند)، هماهنگ با جریان کشندی خروجی از خلیج فارس، غالباً شرق سوی می‌باشند. در واقع، اثر همزمان کشند و هندسه محلی بستر در منطقه مورد مطالعه موجب چرخش رفت و برگشتی جریان‌های محلی به دور جزیره (به موازات خط ساحلی) می‌شود که در نتیجه آن در بخش جنوبی جزیره، جریان به‌شکل رفت و برگشتی عمدتاً شرقی-غربی (با کمی انحراف جنوب-سوی) ظاهر می‌شود.

پساب آب‌شیرین‌کن مورد مطالعه، با دبی ۰/۱۲ متر مکعب بر ثانیه به خلیج فارس می‌ریزد. اگر فرض شود این پساب، نزدیک خط ساحلی تخلیه شود و محدوده اثرگذاری آن تا فاصله حدود ۱ کیلومتر از ساحل (عمق ۵ متر) باشد، با در نظر گرفتن یک سطح مقطع از ساحل تا این فاصله مذکور و انتخاب سرعت متوسط ۰/۲۵ متر بر ثانیه، حجم آب جابجا شده در این مقطع ۶۲۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که نسبت به نرخ حجم ۰/۱۲ متر مکعب بر ثانیه پساب، بسیار بزرگ‌تر است. بنابراین پتانسیل لازم برای آمیختگی کامل این پساب با آب محیط وجود دارد ولی چالش عمده زیست‌محیطی، تعیین مکان تخلیه پساب، به‌ویژه در زمان افزایش ظرفیت تولید آب‌شیرین‌کن، می‌باشد.

از سرعت‌های شرق سو، به‌ویژه برای مؤلفه دیده‌بانی، هستند که می‌تواند ناشی از عدم تقارن کشندی^۱ از نوع فراکشند-چیره^۲ (سرعت‌های قوی‌تر در زمان فراکشند نسبت به سرعت‌های ضعیف‌تر در زمان فروکشند) باشد. این عدم تقارن کشندی در نتایج مدل، به‌ویژه در مناطق کم‌عمق ساحلی، نیز آشکار می‌شود و در نحوه پخش شوری اثرگذار است (بخش‌های ۳-۴ و ۳-۵ را ببینید). عدم تقارن کشندی در محیط‌های با کشند آمیخته-عمدتاً نیم‌روزانه می‌تواند از هر دو اندرکنش مؤلفه‌های اصلی نجومی و مؤلفه‌های کشندی آب‌کم‌عمق ناشی از شکل هندسی محلی حاصل می‌شود (Hoitink et al., 2003; Nidzeiko, 2010; Hosseini et al., 2016).

۳-۳ واسنجی و راستی‌آزمایی مدل

همانطور که در بخش نتایج اندازه‌گیریها مشاهده شد، بخش کشندی جریان‌ها بیشترین سهم را در جریان‌های اندازه‌گیری، به‌ویژه در راستای شرقی-غربی، به خود اختصاص داده است. بنابراین با شبیه‌سازی جریان‌های کشندی می‌توان به الگوی غالب جریان‌ها دست یافت. مقادیر بیشینه مهارت مدل و کمینه خطای استاندارد برای تراز کشندی و اندازه سرعت جریان کشندی در هر دو دوره واسنجی و راستی‌آزمایی به‌ازای ضریب اصطکاک بستری مانینگ $\frac{m^{1/3}}{s}$ ۲۵، در جدول (۳) نشان داده شده است. این مقادیر، تصدیق‌کننده‌ی انطباق خوب نتایج مدل با دیده‌بانی‌ها است.

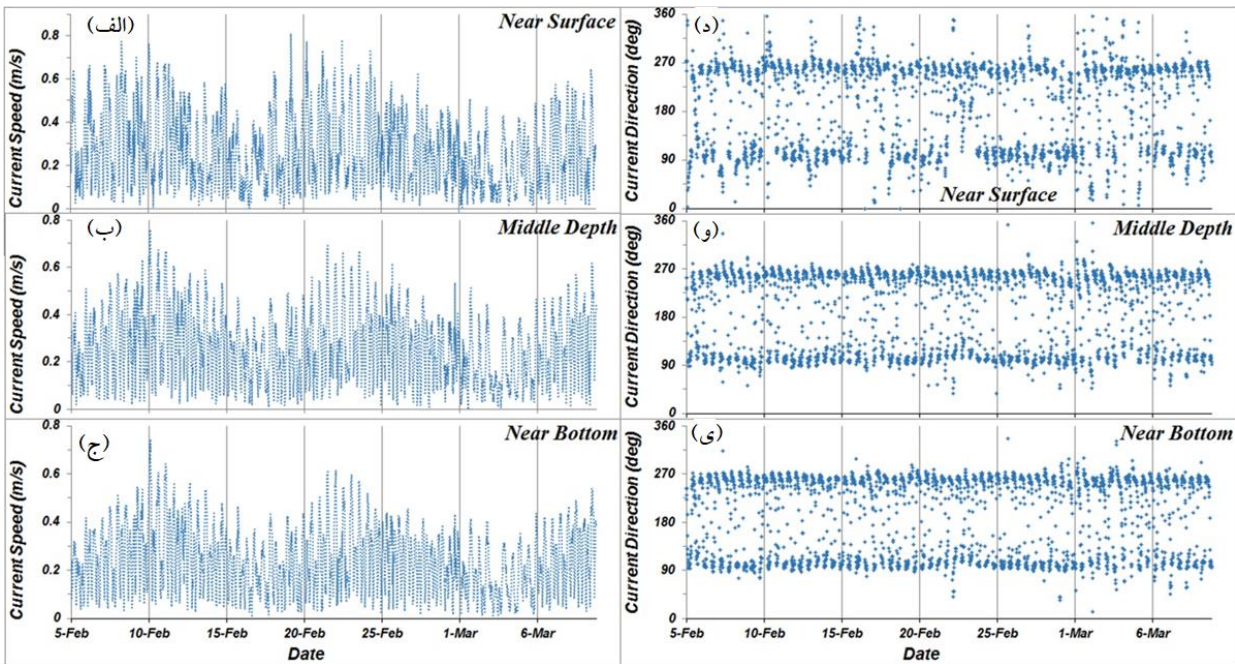
جدول ۳: مهارت مدل و خطای استاندارد برای نوسانات و اندازه سرعت جریان کشندی در مراحل واسنجی^۳ و راستی‌آزمایی^۴

	Model Skill		Standard Error	
	Calibration	Verification	Calibration	Verification
Tidal Fluctuation	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۱۱	۰/۱۱
Tidal Velocity	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۰۴	۰/۰۵

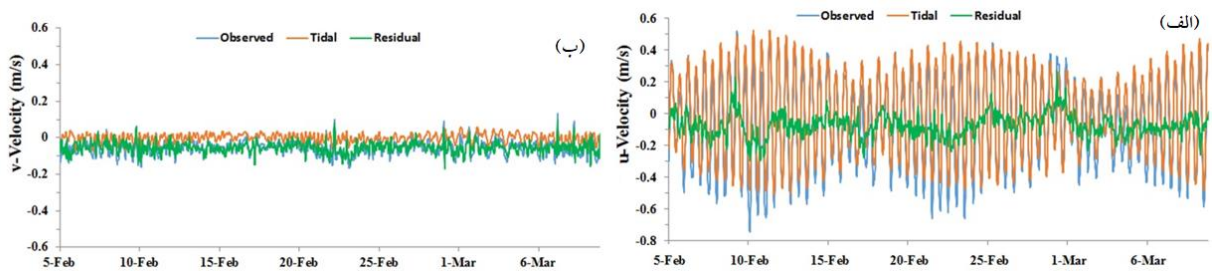
این عملکرد قابل قبول مدل، همچنین، با مقایسه‌ی کیفی نمودارهای سری زمانی تراز (شکل‌های a.۶ و b.۶) و اندازه سرعت (شکل‌های c.۶ و d.۶) حاصل از مدل با داده‌های متناظر

¹ Tidal asymmetry
² Flood-dominance
³ Calibration
⁴ Verification

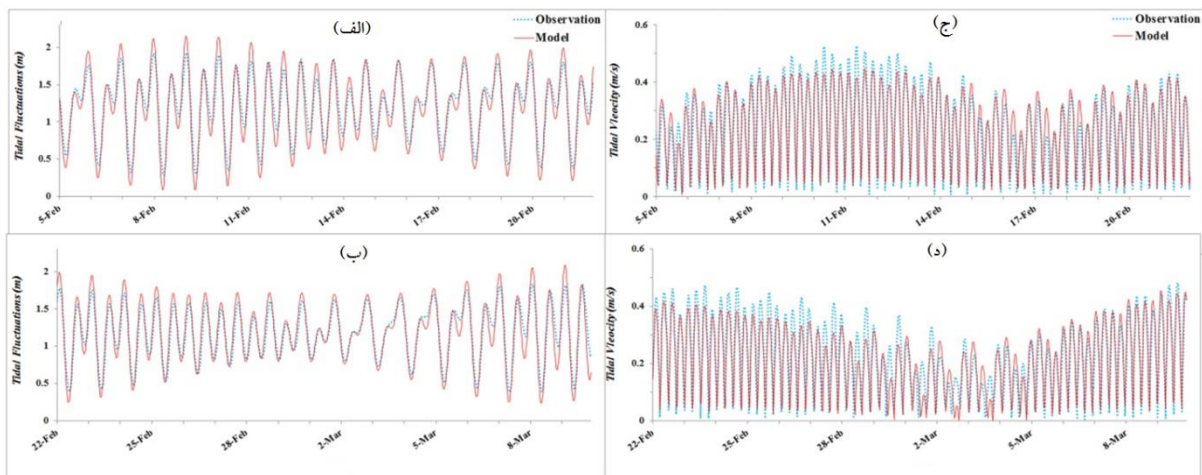
⁵ Ebb Current
⁶ Flood Current



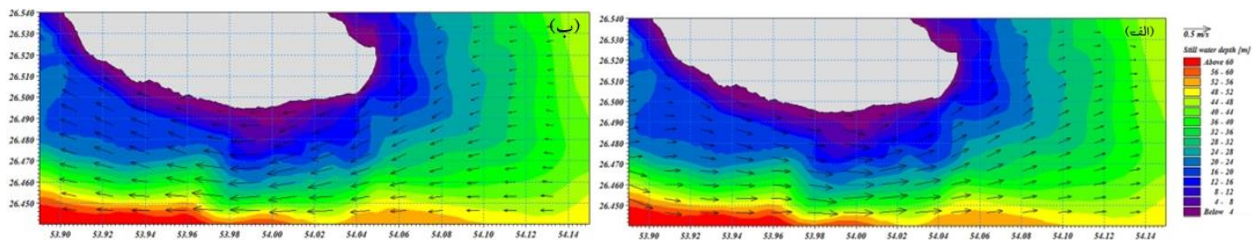
شکل ۴: سری‌های زمانی اندازه و جهت جریان ثبت شده در ایستگاه ADCP



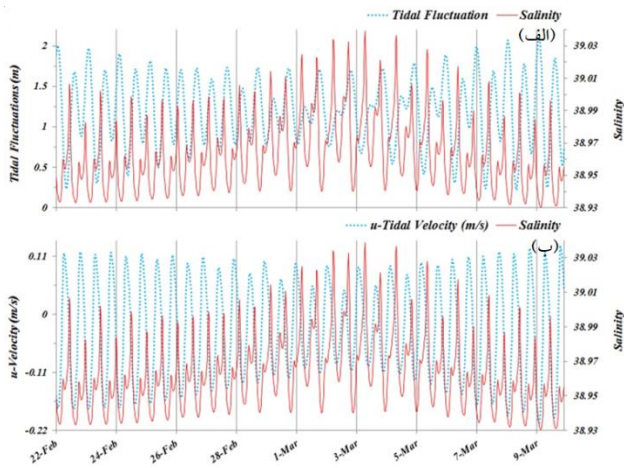
شکل ۵: مؤلفه شرقی-غربی (الف) و مؤلفه شمالی-جنوبی (ب) جریان‌های اندازه‌گیری شده (خط آبی)، جریان کشندی (خط قرمز) و جریان باقیمانده (خط سبز) در لایه میانی (۶/۴ متر بالای بستر). سرعت‌های مثبت به ترتیب معرف سرعت‌های شرق سو (بالا) و شمال سو (پایین) هستند.



شکل ۶: مقایسه نمودارهای سری زمانی تراز حاصل از مدل و اندازه‌گیری شده در ایستگاه ADCP برای دوره‌های واسنجی (الف) و راستی‌آزمایی (ب). مقایسه نمودارهای سری زمانی اندازه سرعت جریان حاصل از مدل و اندازه‌گیری شده در لایه میانی ایستگاه ADCP برای دوره‌های واسنجی (ج) و راستی‌آزمایی (د).



شکل ۷: الگوی دو بعدی جریان‌های کشندی مدل‌سازی شده، (الف) جریان فروکشی و (ب) جریان سیلابی



شکل ۸: نمودارهای سری زمانی کشند-شوری (الف)، و مؤلفه‌ی u سرعت-شوری (ب) در محل تخلیه‌ی پساب در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از ساحل (عمق ۱ متر) برای دوره‌ی ۱۷ روزه‌ی راستی‌آزمایی. سرعت‌های منفی، معرف سرعت‌های غربی در زمان فراکشند (ورود آب از دریای عمان) و سرعت‌های مثبت، معرف سرعت‌های شرقی در زمان فروکشند (خروج آب از خلیج فارس) هستند.

همچنین شکل ۸(ب)، نشان‌دهنده‌ی سرعت‌های بزرگ‌تر در زمان فراکشند است (عدم‌تقارن فراکشند-چیره) که در نتایج تحلیل هارمونیک داده‌های جریان در ایستگاه ADCP، نیز، با قوت کمتری مشاهده شد. با توجه به عمق کمتر محل تخلیه‌ی پساب (عمق ۱ متر) نسبت به عمق ایستگاه ADCP (حدود ۱۲ متر)، انتظار می‌رود رشد مؤلفه‌های کشندی آب‌کم‌عمق در محل تخلیه بیشتر باشد و پیرو آن عدم تقارن فراکشند-چیره در محل تخلیه‌ی پساب، قوی‌تر از محل ایستگاه ADCP باشد.

در دوره‌ی مهکشند، قدرت کشند در آمیختگی ستون آب بیشتر از دوره‌ی کهکشند است (Hosseini and Siadatmousavi, 2017؛ Jay and Smith, 1990; Jay, 2010). این مهم موجب می‌شود، بیشینه‌های شوری (در زمان آب‌ساکن‌های فروکشند) در دوره‌ی کهکشند بیشتر از مقادیر متناظر در دوره‌ی مهکشند باشند و برعکس، کمینه‌های شوری (در زمان آب‌ساکن‌های فراکشند)

در حال حاضر پساب این آب‌شیرین‌کن، در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از ساحل (عمق ۱ متر) تخلیه می‌شود. این سیستم تخلیه موقتی است و به یک مکان مناسب در فاصله‌ی دورتر از ساحل و با عمق بیشتر که ضامن ملاحظات زیست‌محیطی است، انتقال خواهد یافت. با در نظر گرفتن این منبع آلاینده‌ی با شوری ۵۶/۴۳ در مدل، نمودارهای سری زمانی کشند-شوری (شکل ۸(الف))، و مؤلفه‌ی شرقی غربی سرعت-شوری (شکل ۸(ب))، در محل تخلیه‌ی پساب برای دوره‌ی ۱۷ روزه‌ی راستی‌آزمایی ترسیم شدند. به‌علت شباهت نتایج دوره‌ی واسنجی با دوره‌ی راستی‌آزمایی، از نمایش نمودارهای مذکور برای دوره‌ی واسنجی صرف‌نظر شد. دبی کم پساب در مقابل فرارفت قوی کشندی موجب می‌شود، طبق شکل ۸(الف)، فوق‌شوری پساب در محل تخلیه به‌خوبی تا محدوده‌ی بین ۳۸/۹۳ تا ۳۹/۰۴ رقیق شود و از اثرات منفی پساب به‌طور چشم‌گیری کاسته شود. همچنین شوری آب دریا تحت اثر پساب (در محل تخلیه) با اختلاف فازی حدود ۱۸۰ درجه نسبت به نوسانات تراز کشندی تغییر می‌کند.

به‌عبارت دیگر مقادیر بیشینه و کمینه‌ی شوری به‌ترتیب در زمان‌های رخداد آب‌ساکن فروکشند^۱ (زمان کوتاهی در زمان برگشت جریان‌ها از فروکشند به فراکشند) و آب‌ساکن فراکشند^۲ (زمان کوتاهی در زمان برگشت جریان‌ها از فراکشند به فروکشند) رخ می‌دهند.

در واقع، تغییرات زمانی شوری در یک محیط دریایی کم‌عمق تحت اثر کشند و یک پساب فوق‌شور را می‌توان شبیه به تغییرات کشندی شوری در یک مصب معکوس دانست. در مصب‌های معکوس نیز، یک اختلاف فاز ۱۸۰ درجه بین تغییرات شوری با نوسانات کشندی وجود دارد (Hosseini et al., 2018).

¹ Low Water Slack (LWS)

² High Water Slack (HWS)

کند. پیش‌تر گفته شد برای کمینه کردن احتمال رخداد بازچرخش آب شور در آب‌گیر، باید آب‌گیر در مکانی انتخاب شود که شوری آن حداکثر ۰/۱ واحد شوری از دریای مجاور بیشتر باشد (Patel et al., 2016).

در شکل (۱۰الف))، میدان چگالی آب در منطقه مورد مطالعه، برای زمان رخداد بیشینه شوری ۳۹/۱۲۰ نشان داده شده در شکل ۹ الف))، ارائه شده است تا امکان تشکیل آب چگال، فرو رفتن و انباشتگی آن در نزدیک بستر دریا، بررسی شود. شکل (۱۰ب)) الگوی دما، در همین زمان را نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شود که حتی با وجود عمق حدود ۱ متر در محل تخلیه‌ی پساب، به دلیل حجم کم پساب و آمیختگی سریع آن با آب محیط، چگالی عمدتاً تحت اثر توزیع دمای آب دریا است و امکان تشکیل آب چگال، وجود ندارد. بنابراین می‌توان از انباشتگی پساب در نزدیکی بستر دریا چشم‌پوشی کرد.

۳-۵ مکان بهینه خروج پساب

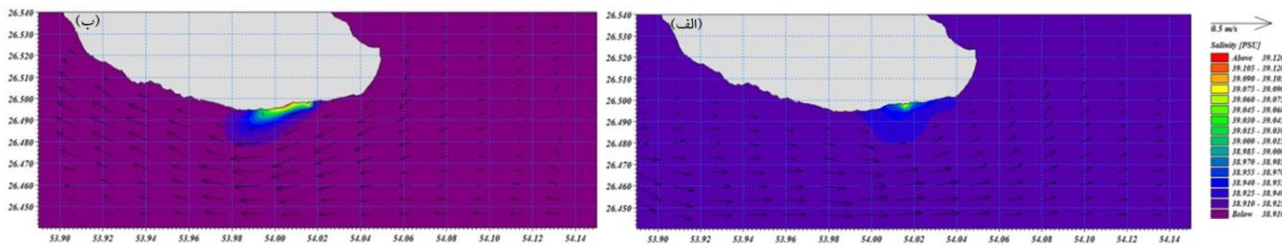
بنا به اظهار نظر مسئولین سایت آب‌شیرین‌کن، محل فعلی تخلیه پساب (در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از ساحل و عمق ۱ متر)، با یک اطاله ۶۰۰ متری به فاصله ۸۰۰ متری از ساحل به نقطه‌ای با عمق ۳ متر منتقل خواهد شد. از این‌رو مدل‌سازی پخش آلودگی شوری برای این نقطه بررسی می‌شود. از طرف دیگر، انتخاب محل تخلیه پساب در نقطه‌ای دورتر با عمق بیشتر مثل فاصله ۱۵۰۰ متری با عمق ۶ متر نیز پیشنهاد شده است که مدل‌سازی آن با مدل‌سازی‌های مربوط به خروجی پساب در فواصل ۲۰۰ متر (عمق ۱ متر) و ۸۰۰ متر (عمق ۳ متر) مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا مکان بهینه‌ی خروجی پساب با توجه به نحوه و میزان پخش، تعیین شود. مشابه شکل‌های (۹الف)) و (۹ب))، الگوهای دو بعدی شوری در زمان‌های نزدیک به آب‌ساکن‌های فروکشند و - فراکشند دوره‌ی کهکشند، برای خروجی پساب در فواصل ۸۰۰ متر (شکل‌های ۱۱الف)) و (۱۱ب)) و ۱۵۰۰ متر (شکل‌های ۱۱ج)) و (۱۱د)) بررسی می‌شوند.

در اثر جریان سیلابی زبانه آب شور در امتداد ساحل به سمت غرب کشیده شده و تا نواحی جنوب و جنوب غربی جزیره امتداد می‌یابد. با برگشت جریان از فراکشند به فروکشند (جریان فروکشی)، زبانه آب شور به سمت شرق کشیده می‌شود.

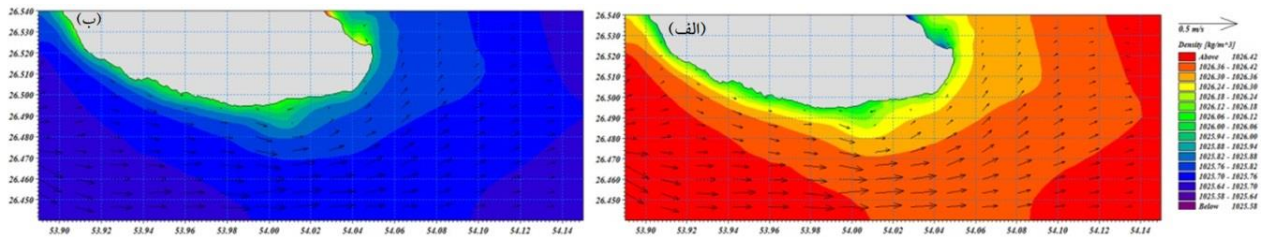
در دوره‌ی مهکشند، مقادیر کمتری نسبت به کمینه‌های متناظر در دوره‌ی کهکشند داشته باشند. به‌عنوان مثال، طبق شکل (۸)، بیشترین مقدار شوری آب دریا در محل تخلیه‌ی پساب فوق‌شور، برابر ۳۹/۰۴ واحد شوری است که در دوره‌ی کهکشند (روز ۳ مارس ۲۰۱۶) رخ داده است و اختلاف ۰/۱۲ واحد شوری با آب دریای مجاور (با شوری ۳۸/۹۲) دارد. در مقابل، رخداد کمترین مقدار شوری ۳۸/۹۳ (با حدود فقط ۰/۰۱ بیشتر از شوری آب دریای مجاور) مربوط به دوره‌ی مهکشند (روز ۹ مارس ۲۰۱۶) است. با توجه به بیشینه بودن اثر پساب روی آب دریا در دوره‌ی کهکشند، الگوی دو بعدی تغییرات شوری، فقط در این دوره نمایش داده می‌شود.

این الگو در اواخر زمان فروکشند (نزدیک به آب‌ساکن فروکشند در زمان ۳ مارس ۲۰۱۶ ساعت ۱۷:۲۰)، در شکل (۹الف))، نشان داده شده است. در این زمان، بیشینه‌ی شوری ناشی از پساب (در نزدیکی محل تخلیه) رخ می‌دهد و پخش (کشیدگی) پساب، تحت اثر جریان‌های فروکشی به سمت شرق بوده است. شکل (۹ب)) همین الگو را برای اواخر زمان فراکشند بلافاصله بعد از آب‌ساکن فروکشند مذکور (نزدیک به آب‌ساکن - فراکشند در زمان ۳ مارس ۲۰۱۶ ساعت ۲۳:۴۰)، با رخداد کمینه - ی شوری ناشی از پساب و با کشیدگی به سمت غرب، نشان می‌دهد. در واقع، این پساب فوق‌شور به شکل یک هسته آب شور ظاهر می‌شود و در مجاورت خط ساحلی، به سمت شرق (با جریان فروکشی) و غرب (تحت اثر جریان سیلابی) کشیده می‌شود و از شوری آن در نتیجه‌ی فرارفت و آمیختگی کاسته می‌شود.

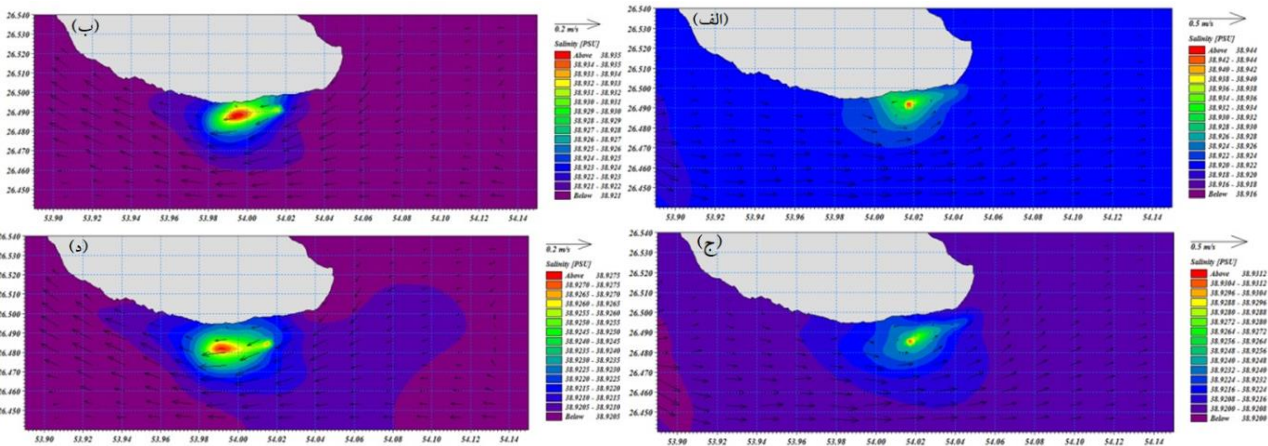
نزدیک به زمان آب‌ساکن فروکشند (شکل ۹الف))، شوری دریا در نزدیکی تخلیه‌ی پساب تا ۳۹/۱۲۰ افزایش می‌یابد درحالی‌که نزدیک به آب‌ساکن‌فراکشند (شکل ۹ب)) بیشینه‌ی شوری در نزدیکی تخلیه‌ی پساب تا حدود ۳۸/۹۹۵ پایین می‌آید. بنابراین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد شرط لازم زیست‌محیطی (شوری ناشی از پساب در فاصله ۲۰۰ متری از محل تخلیه آن، بیشتر از ۴۱/۸۱۲ واحد شوری نباشد)، حتی برای پساب با خروجی در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از ساحل، ارضا می‌شود. ولی وجود اختلاف شوری برابر ۰/۲ بین بیشینه شوری ناشی از پساب (۳۹/۱۲) و شوری دریا (۳۸/۹۲)، قرار گرفتن آب‌گیر آب‌شیرین - کن در نزدیکی محل رخداد این بیشینه‌شوری را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد چراکه امکان تولید بازچرخش در آب‌گیر را فراهم می‌



شکل ۹: پخش شوری ناشی از تخلیه‌ی پساب آب شیرین‌کن در فاصله ۲۰۰ متری از ساحل در اواخر زمان‌های فروکشند (الف) و فراکشند (ب) دوره‌ی کهکشند



شکل ۱۰: توزیع چگالی آب دریا (الف) و دمای آب (ب) با وجود تخلیه‌ی پساب آب شیرین‌کن در فاصله ۲۰۰ متری از ساحل



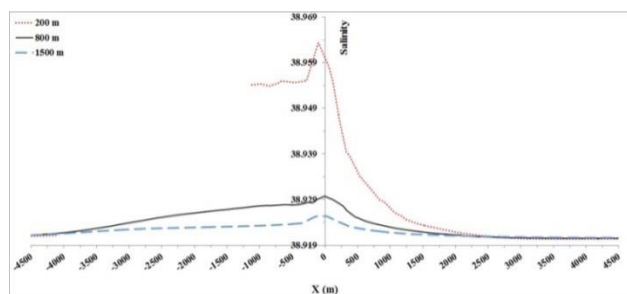
شکل ۱۱: پخش شوری ناشی از تخلیه‌ی پساب آب شیرین‌کن در فاصله ۸۰۰ متری از ساحل در اواخر زمان‌های فروکشند (الف) و فراکشند (ب) و در فاصله ۱۵۰۰ متری از ساحل در اواخر زمان‌های فروکشند (ج) و فراکشند (د) دوره‌ی کهکشند.

را فراهم می‌کند. در شکل (۱۲)، موقعیت‌های خط عمودی y در طول جغرافیایی $54^{\circ}16'7''$ درجه شرقی و سه خط افقی $x=200$ ، $x=800$ و $x=1500$ به ترتیب در عرض‌های جغرافیایی $26^{\circ}49'26''$ ، $26^{\circ}49'12''$ و $26^{\circ}48'55''$ درجه شمالی گذرا از محل‌های تخلیه‌ی پساب در هریک از سه مدل‌سازی (خروج پساب در فواصل ۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ متر) نمایش داده شده است تا تغییرات یک‌بعدی شوری (شکل‌های ۱۳ و ۱۴)، برای میانگین زمانی $27/32$ روز، در راستای این خطوط به‌طور کیفی و کمی ارزیابی شود و نحوه‌ی مناسب پخش و رقیق شدن قابل قبول پساب با محل تخلیه در فاصله‌ی ۸۰۰ متری از ساحل مورد بازبینی و تأیید قرار گیرد. علت انتخاب بازه زمانی $27/32$ روز آن است که در محیط‌هایی که مؤلفه‌های روزانه قوی هستند، به‌ویژه در سیستم‌های با کشند

برای خروجی پساب در فاصله‌ی ۱۵۰۰ متر (شکل‌های ۱۱(ج)) و ۱۱(د)) شوری در منطقه‌ی وسیع‌تری پخش و رقیق می‌شود به طوری‌که در این شرایط، بیشینه‌ی شوری حدود $0/01$ واحد از شوری متوسط دریا ($38/92$) بیشتر است. بنابراین نیازی به انتقال محل خروجی پساب به مناطق دورتر نیست. برای پساب با تخلیه در فاصله‌ی ۸۰۰ متر، بیشینه شوری آن نیز حدود $0/01$ واحد شوری، نسبت به پساب ۱۵۰۰ متری بیشتر است و تا $38/944$ رقیق می‌شود. بنابراین افزایش تقریباً ۲ برابری طول لوله‌ی حامل پساب از فاصله‌ی ۸۰۰ متر به ۱۵۰۰ متر، به‌ویژه به‌لحاظ اقتصادی، غیرضروری است. در نتیجه به‌نظر می‌رسد، تعبیه خروجی پساب آب‌شیرین‌کن در فاصله ۸۰۰ متری و عمق ۳ متری برای حجم و شوری موجود پساب گزینه مناسبی است و الزامات زیست‌محیطی

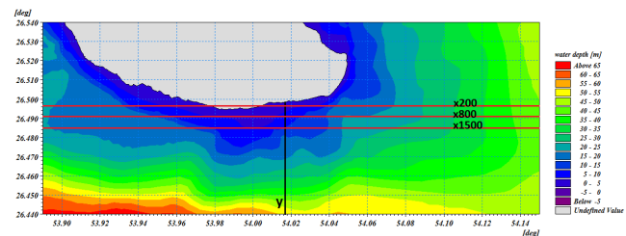
می‌دهد که بیانگر حرکت آلودگی شوری به سمت ساحل است که ممکن است موجب وقوع مشکلات زیست‌محیطی، به‌ویژه با بیشتر شدن ظرفیت تولید آب‌شیرین‌کن، شود. بنابراین این محل برای تخلیه‌ی پساب مناسب نیست. محل رخداد بیشینه‌های شوری ناشی از پساب‌های ۸۰۰ متری و ۱۵۰۰ متری، در راستای خط عمود بر ساحل، در نزدیکی محل تخلیه است و مقادیر آن برابر با ۳۸/۹۳۰ برای پساب ۸۰۰ متری و ۳۸/۹۲۵ برای پساب ۱۵۰۰ متری می‌باشند. مقدار شوری پساب ۸۰۰ متری تنها در فرساحل (از خط ساحلی تا فاصله‌ی ۵۰۰ متر) اندکی از پساب ۱۵۰۰ متری بیشتر است (کمتر از ۰/۰۰۵ واحد شوری). با در نظر گرفتن طول نفوذ شوری^۳ پساب از مکان تخلیه تا محلی که شوری دریا حاکم شود (اختلاف شوری آن محل با شوری دریا، ۳۸/۹۲، کمتر ۰/۰۱ شود)، می‌توان گفت طول نفوذ شوری ناشی از پساب‌های ۸۰۰ متر و ۱۵۰۰ متر در سمت فرساحل به ترتیب حدود ۲۹۰ متر و ۱۱۴ متر می‌باشد (شکل ۱۳).

تغییرات یک‌بعدی شوری ناشی از تخلیه‌ی سه پساب مذکور در راستای سه خط موازی ساحل (خطوط x200، x800 و x1500 در شکل ۱۲)، برای میانگین زمانی ۲۷/۳۲ روز، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این تغییرات در دو شعاع ۴۵۰۰ متری در دو سوی غرب (با علامت منفی) و شرق (با علامت مثبت) محل‌های تخلیه نمایش داده شده اند. در فواصل بیش از ۴۵۰۰ متر، اختلاف شوری ناشی از پساب‌ها در راستای خطوط مذکور قابل چشم‌پوشی است. به دلیل وجود خشکی (برآمدگی جزیره) در سمت غرب محل تخلیه‌ی پساب ۲۰۰ متری، روی خط موازی ساحل آن (خط x200 در شکل ۱۲) از فاصله‌ی ۱۱۰۰- تا ۴۱۰۰- متری داده‌ی شوری وجود ندارد.



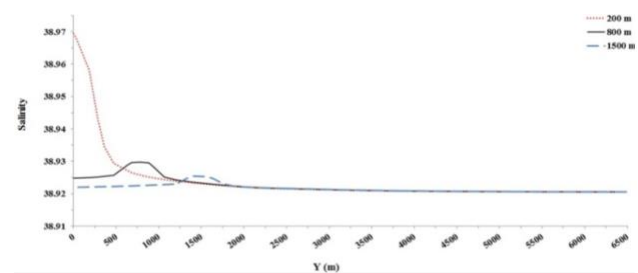
شکل ۱۴: تغییرات یک‌بعدی شوری حاصل از مدل در راستای سه خط موازی ساحل (خطوط x200، x800 و x1500 در شکل ۱۲)، گذرا از محل‌های مورد بررسی تخلیه‌ی پساب در فواصل ۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ متر برای میانگین زمانی ۲۷/۳۲ روز.

آمیخته-عمدتاً نیم‌روزانه (مانند منطقه‌ی مورد مطالعه)، اندرکنش مؤلفه‌های اصلی سه‌گانه‌ی O_1 ، K_1 و M_2 ، عدم‌تقارن کشندی متناوب با دوره‌ی ۱۳/۶۶ روز (برابر با نصف ماه نجومی^۱ یا یک دوره‌تناوب دوره‌ی مه‌کشند-کهکشند) با تغییر در نابرابری روزانه^۲ تولید می‌کند (Nidzeiko, 2010; Hosseini et al., 2016). بنابراین برای در نظر گرفتن اثر این عدم تقارن، به‌ویژه در اندرکنش آن با عدم تقارن ناشی از مؤلفه‌های آب کم‌عمق، بایستی حداقل یک دوره‌ی ۱۳/۶۶ روز در نظر گرفته شود. در این مطالعه با توجه به مدت اندازه‌گیری‌های ۳۵ روزه، دو دوره‌ی ۱۳/۶۶ روز (برابر با یک ماه نجومی ۲۷/۳۲ روز) پایانی اندازه‌گیری‌ها از تاریخ ۱۲ فوریه ۲۰۱۶ ساعت ۰۰:۴۰ تا ۱۰ مارس ۲۰۱۶ ساعت ۰۸:۲۰ انتخاب شد.



شکل ۱۲: خطوط افقی و عمودی گذرا از محل‌های مورد بررسی تخلیه‌ی پساب در فواصل ۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ متر

شکل ۱۳، تغییرات شوری ناشی از تخلیه‌ی سه پساب مختلف در فواصل ۲۰۰ متر، ۸۰۰ متر و ۱۵۰۰ متر از ساحل را در راستای خط عمود بر ساحل (خط y در شکل ۱۲) نشان می‌دهد. در این شکل، مبدأ نمودار در خط ساحلی است.



شکل ۱۳: تغییرات یک‌بعدی شوری حاصل از مدل در راستای خط عمود بر ساحل (خط y در شکل ۱۲)، گذرا از محل‌های مورد بررسی تخلیه‌ی پساب در فواصل ۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ متر برای میانگین زمانی ۲۷/۳۲ روز

در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که برای پساب با محل تخلیه‌ی ۲۰۰ متری از ساحل، بیشینه‌ی شوری ۳۸/۹۷ در خط ساحلی رخ

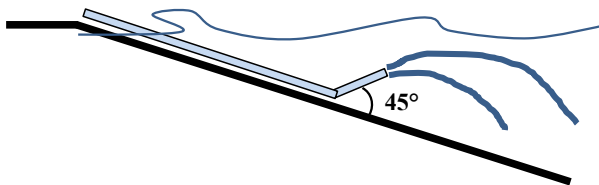
^۱ One-half sidereal month

^۲ Diurnal inequality

^۳ Salt intrusion

۳-۶ نحوه‌ی بهینه‌ی خروج پساب

به دلیل چگال‌تر بودن پساب آب شیرین‌کن با سیستم اسمز معکوس نسبت به آب دریا، برای جلوگیری از تشکیل لایه آب چگال، سیستم تخلیه با پخش‌کننده پیشنهاد می‌شود. بدین منظور از نرم افزار توسعه یافته توسط (Jirka 2008) استفاده شد. در این نرم افزار مشخصات حجم آب ورودی، حجم پساب، مشخصات فیزیکی آب دریا و پساب شامل دما و شوری، شیب ساحل، زاویه مورد نظر برای خروجی، ارتفاع خروجی از بستر دریا، تعداد خروجی‌ها در پخش‌کننده و قطر دهانه آنها وارد شده و سپس مشخصات هیدرولیکی جریان خروجی محاسبه می‌شود. طبق این محاسبات، بهترین نحوه‌ی خروجی پساب، داشتن ارتفاع ۰/۵ متر از بستر دریا و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح بستر با حداقل ۵ خروجی با قطر ۱۰ سانتی متری می‌باشد که در منطقه‌ای با عمق ۳ متر و فاصله ۸۰۰ متر از ساحل برپا می‌شود. این سیستم تخلیه پساب واحدهای مورد بهره‌برداری فعلی را به نحو مناسبی وارد محیط دریایی خواهد کرد. در شکل (۱۵)، نمای شماتیک این سیستم تخلیه نشان داده شده است.



شکل ۱۵: شکل شماتیک سیستم تخلیه پساب

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور بررسی وضعیت اثر زیست محیطی پساب آب شیرین‌کن (با سیستم اسمز معکوس) در ساحل جنوب شرقی جزیره‌ی کیش، بهترین محل پیشنهادی برای خروجی آب شیرین‌کن کیش را بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌سازی عددی مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده است. تحلیل داده‌های میدانی ۳۵ روزه نشان داد که در منطقه‌ی مورد مطالعه، نظام کشندی آمیخته، عمدتاً نیم‌روزانه (عدد شکل کشندی ۰/۳۸)، حاکم است و موجب می‌شود جریان عمدتاً کشندی منطقه، به‌صورت تقریباً خطی در راستای شرقی- غربی آشکار شود. در این بین، جریان باقیمانده نقشی جزئی را روی جریان کلی دیده‌بانی شده ایفا کرد

برای هر پساب مبدأ نمودار در محل تخلیه آن در نظر گرفته شده است و فواصل مثبت و منفی به ترتیب معرف مکان‌های شرق (هم‌جهت با جریان فروکشی) و غرب (هم‌جهت با جریان سیلابی) محل تخلیه هستند.

در منطقه‌ی مورد مطالعه، میزان شوری و پراکندگی آن هم-جهت با جریان سیلابی در سمت غرب محل تخلیه، به‌ویژه برای پساب در فاصله‌ی ۲۰۰ متر، بیشتر از سمت شرق است (شکل ۱۴). علت این امر، علاوه بر مانع خشکی در فاصله‌ی ۱۱۰۰- تا ۴۱۰۰- متر، همچنان‌که پیش‌تر گفته شد، وجود عدم تقارن فراکشند-چیره (جریان‌های سیلابی قوی‌تر نسبت به جریان‌های فروکشی ضعیف‌تر) در آب‌های کم‌عمق جنوب شرق جزیره‌ی کیش می‌باشد. تحت اثر این شرایط، اولاً بیشینه‌ی شوری ناشی از پساب در فاصله‌ی ۲۰۰ متری، در فاصله‌ی حدود ۱۰۰ متری غرب محل تخلیه، تشکیل می‌شود.

با دور شدن از ساحل و کاهش اثرات غیرخطی (ضعیف شدن مؤلفه‌های آب کم‌عمق)، شرایط فراکشند-چیره نیز ضعیف می‌شود و پیرو آن محل شکل‌گیری بیشینه‌ی شوری ناشی از پساب-های فواصل ۸۰۰ و ۱۵۰۰ متری به مکان تخلیه‌ی پساب نزدیک‌تر می‌شود و در شعاع کمتر از ۲۵ متر از محل تخلیه قرار می‌گیرد. ثانیاً، طول نفوذ یا کشیدگی شوری ناشی از پساب‌های فواصل ۸۰۰ متر و ۱۵۰۰ متر در سمت غرب مکان تخلیه بیشتر از جهت شرقی است. طول نفوذ پساب در جهت غرب، حدود ۲۵۵۲ متر و ۱۸۸ متر به ترتیب برای پساب‌های با مکان‌های تخلیه در فاصله-ی ۸۰۰ متر و ۱۵۰۰ متر از ساحل، است درحالی‌که برای این پساب‌ها طول‌های نفوذ شرقی به مقادیر حدود ۵۰۲ متر و ۸۰ متر کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، طول نفوذ شوری کمتر برای پساب در فاصله‌ی ۱۵۰۰ متر از ساحل نسبت به پساب در فاصله‌ی ۸۰۰ متری، به دلیل میزان ترقیق بالاتر در فاصله‌ی دورتر از ساحل است. همچنین طول نفوذ شوری پساب، تحت اثر جریان‌های کشندی، در راستای افقی x عمدتاً بیشتر از راستای عمودی y است.

در شکل ۱۴، اختلاف بیشینه پساب ۸۰۰ متری نسبت به پساب ۱۵۰۰ متری کمتر از ۰/۰۰۵ واحد شوری است. رسیدن به این اختلاف اندک، منوط به افزایش طول لوله‌ی حامل پساب به-اندازه حدود ۷۰۰ متر است که به لحاظ هزینه اجرایی منطقی نیست. بنابراین گزینه‌ی انتخابی برای محل خروجی پساب، فاصله‌ی ۸۰۰ متری از ساحل می‌باشد.

2015. Wind and tidal mixing controls on stratification and dense water outflows in a large hypersaline bay. *Journal of Geophysical Research*, 10.1002/2015JC010733: 6034-6056.

Hoitink, A.J.; Hoekstra, P.; Van Maren, D.S., 2003. Flow asymmetry associated with astronomical tides: implications for the residual transport of sediment. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 108(C10), doi:10.1029/2002JC001539.

Hosseini, S.T.; Siadatmousavi, S.M., 2017. Field Observations of Hypersaline Runoff through a Shallow Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 202 (2018) 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.12.003>.

Hosseini, S.T.; Chegini, V.; Sadrinasab, M.; Siadatmousavi, S.M., 2018. Temperature, Salinity and Water-Age Variations in a Tidal Creek Network, Bushehr Port, Iran. *Journal of Coastal Conservation*, <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0616-y>.

Hosseini, S.T.; Chegini, V.; Sadrinasab, M.; Siadatmousavi, S.M.; Yari, S., 2016. Tidal asymmetry in a tidal creek with mixed mainly semidiurnal tide, bushehr Port, Persian Gulf. *Ocean Science Journal*, 51 (2), 195-208. <https://doi.org/10.1007/s12601-016-0017-9>

Jay, D.A., 2010. Estuarine variability, In: Valle-Levinson, A. (Ed.), *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. First Edition. Cambridge University Press. 62-99PP. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511676567.005>

Jay, D.A.; Smith, J.D., 1990. Circulation, density distribution and neap-spring transitions in the Columbia River Estuary. *Journal of Progress Oceanography*, 25, 81-112. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(90\)90004-L](https://doi.org/10.1016/0079-6611(90)90004-L)

Jirka, G.H., 2008. Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1): 116-120.

و موجب انحراف جنوب‌سوی ناچیز این جریان شد. با توجه با این اندازه گیری‌ها، مدل محلی مورد استفاده (MIKE 21 FM)، با ضریب مانینگ ۲۵ واسنجی شد و مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت که مقادیر قابل قبول پارامترهای آماری مهارت مدل و خطای استاندارد بیانگر صحت عملکرد مدل در شبیه‌سازی تراز و جریان کشندی منطقه مورد مطالعه بود. بعد از آن با شبیه‌سازی عددی پخش فوق‌شوری ناشی از پساب آب‌شیرین‌کن، الزامات محل خروجی آب شیرین‌کن بررسی شد. نتایج مدل در این بخش بیانگر وجود اختلاف فاز حدود ۱۸۰ درجه بین تغییرات زمانی شوری آب دریا در محل تخلیه پساب و نوسانات تراز کشندی بود. همچنین نتایج نشان داد که بیشینه اثر شوری پساب روی دریای پیرامونی در دوره‌ی کهکشند، رخ می‌دهد و پساب عمدتاً با الگوی جریان‌های کشندی حرکت می‌کند.

برای سه نقطه در فواصل ۲۰۰ متری، ۸۰۰ متری و ۱۵۰۰ متری از ساحل و با اعماق به ترتیب ۱، ۳ و ۶ متر مدل‌سازی پخش آلودگی شوری انجام شد و در نتیجه‌ی آن تخلیه پساب در فاصله ۸۰۰ متری از خط ساحلی (عمق ۳ متر) انتخاب گردید. همچنین نحوه بهینه‌ی تخلیه پساب نیز مورد بررسی قرار گرفت و در نتیجه‌ی آن زاویه ۴۵ درجه بین لوله حامل پساب و تراز بستر و نیز وجود ۵ خروجی با قطر ۱۰ سانتیمتر در محل تخلیه، به‌عنوان بهترین نحوه تخلیه برای رخدادهای بیشترین میزان پخش، تعیین شد.

۵. سیاست‌گذاری

این مطالعه، با حمایت شرکت توسعه آب و برق کیش انجام شده است.

منابع

Alnajjar, H.S., 2015. Numerical Modeling of Brine Disposal for Gaza Central Seawater Desalination Plant. MSc Thesis. Civil Infrastructure Engineering, Islamic University of Gaza. 161P.

DHI, 2014. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module- Scientific Documentation. 58P.

Hetzl, Y.; Pattiaratchi, C.; Lowe, R.; Hofmeister, R.,

- Issue 3, May–June 2016, pp. 316–328, Article ID: IJCIET_07_03_031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:1\(116\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(116))
- Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*. 2002;28(8):929-37. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Sun, Y.J.; Cho, Y.K.; Park, K.S.; Yoon, S.M.; Moon, J.K., 2012. Simulation of brine discharge near sea farms in the Korea Strait. *Desalination and Water Treatment*, 43(1-3), 201-211. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.672171>
- Warner, J.C.; Geyer, W.R.; Lerczak, J.A., 2005. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment, *Journal of Geophysical Research*, 110, C05001, doi:10.1029/2004JC002691.
- Memari, S.; Siadatmousavi, S.M., 2018. Numerical Modeling of Heat and Brine Discharge near Qeshm Desalination Plant. *International Journal of Coastal & Offshore Engineering*. Vol.2 /No. 1/Winter 2018 (27-35). <https://doi.org/10.29252/ijcoe.1.4.27>
- National Ocean Service (2000), *Tide and Current Glossary*, NOAA, Silver Spring, Md.
- Nidziko, N.J., 2010 Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 115(C8):C08006. doi:10.1029/2009JC005864.
- Patel, Y.B.; Nimbalkar, P.T.; Nagendra, T.; Shukla, V.K., 2016. Numerical Modeling of Brine Dispersion in Shallow Coastal Waters. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 7,