

## مدلسازی عددی اثر تبخیر بر شوری آب خلیج فارس

صمد رسول پور<sup>۱</sup>، حسن اکبری<sup>۲\*</sup>، احمد رضایی مزیک<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دکتری مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

\* Email: akbari.h@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

### چکیده

محدود بودن محیط آبی خلیج فارس و قرار گرفتن در ناحیه خشک و بیابانی سبب شده است که تبخیر به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی نقش زیادی در روند شوری و تبادل آب خلیج فارس داشته باشد. از آنجایی که با روند گرم شدن دمای هوای کره زمین و کاهش نزولات جوی از طرف دیگر، پیش‌بینی می‌شود تبخیر روند افزایشی داشته باشد، بررسی اثر این پدیده بر شوری خلیج فارس و تأسیسات ساخته شده به ویژه عملکرد آب شیرین‌کن‌ها اهمیت بسزایی دارد. از این رو تحقیق حاضر، با هدف بررسی گردش آب در خلیج فارس و ارزیابی تأثیر مستقیم تبخیر آب بر شوری و تبادل آب با دریای عمان انجام شده است. در این راستا، مدلسازی عددی جریان با لحاظ نمودن اثر تبخیر در محدوده دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از مدل سه بعدی بسته نرم‌افزاری Mike3-Flow Model FM انجام شده و داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل هیدرودینامیکی از مدل HYCOM و داده‌های جوی مورد نیاز از مدل ECMWF استخراج شده است. برای ارزیابی و درستی آزمایشی مدل عددی، خروجی‌های مدل هیدرودینامیک با داده‌های TPXO و ترازهای جزر و مدی مقایسه و با استفاده از پارامترهای آماری ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربع خطا محاسبه شده است. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد میزان آب ورودی تجمعی به خلیج فارس با درصد افزایش تبخیر رابطه نسبتاً خطی دارد. همچنین افزایش تبخیر آب از سطح خلیج فارس اثر شدیدی در شوری خلیج فارس داشته و این اثر در سطح خلیج فارس گسترده اما متغیر است، به طوری که نواحی نزدیک تر به تنگه هرمز اثر کمتری از افزایش تبخیر گرفته اند و افزایش شوری در نواحی کم عمق شمالی و سواحل جنوبی موجب افزایش میانگین شوری خلیج فارس شده است. به صورت میانگین، افزایش ۵۰ درصدی تبخیر موجب افزایش شوری آب به میزان 3 psu و افزایش ۱۰۰ درصدی تبخیر موجب افزایش شوری آب به میزان 6 psu شده است.

**کلمات کلیدی:** هیدرودینامیک؛ شبیه‌سازی عددی؛ خلیج فارس؛ تبخیر؛ شوری.

### ۱- مقدمه

از زمان پایان پالئوژئوئیک در عرض‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری باقی مانده است که منجر به آب و هوای بیش از حد خشک با بارش بسیار کم و میزان تبخیر زیاد است [3]. به دلیل هوای گرم و خشک این ناحیه، تبخیر آب از سطح خلیج فارس بسیار زیاد است (۱٫۸۴ متر در سال) و بسیار بیشتر از ورودی آب شیرین به خلیج فارس است [4]. این نرخ بالای تبخیر می‌تواند منجر به افزایش سطح شوری

خلیج فارس یک دریای کم عمق است که از طریق تنگه هرمز به دریای عمان وصل شده است و از مصب اروندرود تا شبه جزیره مسندم در عمان امتداد یافته است [1]. این خلیج با وسعت  $2.4 \times 10^5$  کیلومتر مربع و با عمق متوسط 36 متر سومین خلیج بزرگ جهان است. میانگین حجم آب خلیج فارس را  $8.6 \times 10^6$  کیلومتر مکعب گزارش شده است [2].

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- معادلات حاکم

در این مطالعه از نرم‌افزار MIKE3-Flow Model FM برای حل معادلات هیدرودینامیک و انتقال شوری استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی هیدرودینامیک دریا در سه بعد را داراست و سرعت شبیه‌سازی و دقت محاسبات از مزایای آن است [14]. میدان ۳ بعدی جریان را با حل عددی معادلات پیوستگی و معادلات اندازه حرکت با فرض بوزینسک و تراکم ناپذیر بودن سیال محاسبه می‌کند. در ادامه معادلات مربوط به پیوستگی و اندازه حرکت آمده است. معنی علائم بکار رفته در روابط در پیوست الف آمده است.

معادله پیوستگی:

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

معادلات دوبعدی افقی مومتموم برای مؤلفه‌های x و y:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = \quad (2)$$

$$fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = \quad (3)$$

$$fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

جملات تنش افقی در راستاهای x و y به صورت زیر ساده سازی شده‌اند:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (5)$$

و از آنجا که فرض کردیم سیال تراکم ناپذیر است، چگالی آب مستقل از فشار است و فقط تحت اثر دما و شوری از طریق معادله حالت [15] تغییر می‌کند:

$$\rho = \rho(T, s) \quad (6)$$

انتقال دما و شوری از معادله پخش و جابه‌جایی زیر

در مناطق کم عمق خلیج فارس شود. برآورد نرخ خالص تبخیر بین 336 کیلومتر مکعب در سال تا 1200 کیلومتر مکعب در سال متغیر است [2, 5] و مقدار آن بسیار بیشتر از بارندگی (23 کیلومتر مکعب در سال) است [1]. چائو میزان تبخیر آب در خلیج فارس را 1.2 تا 2 متر ستون آب در سال برآورد کرده است [6]. تبخیر شدید خلیج را به یک مصب معکوس تبدیل می‌کند که در آن آب شور خلیج از طریق تنگه هرمز خارج می‌شود و جریان آب‌های سطحی با شوری کم از خلیج عمان وارد محیط خلیج فارس می‌شود [7].

آب چگال از مناطق شمال‌غربی خلیج فارس در تمام طول سال به سمت تنگه هرمز هدایت می‌شود، در حالی که خروج آب از محل تبخیر در بخش جنوب غربی در زمستان بیشترین شوری را ایجاد می‌کند. این آب چگال به صورت آب گرم و شور در عمق نزدیک بستر از خلیج فارس خارج می‌شود [8]. تغییرات در بازه زمانی سالانه گردش از تغییرات تبخیر-بارندگی که بر تبادله آب در تنگه هرمز تأثیر می‌گیرد، از سازوکارهای مختلفی که گردش را در خلیج فارس هدایت می‌کنند (جریان‌های چگالی و جریان‌های ناشی از باد) و برهمکنش‌های غیرخطی آنها ناشی می‌شود [9].

لازم به توضیح است که علاوه بر تبخیر پارامترهای متعدد دیگری از جمله پساب کارخانه‌های نمک‌زدایی [10]، سرعت وزش باد [11]، تغییر دبی رودخانه‌های ورودی مانند ارون‌رود [12] و همچنین تغییرات اقلیمی [13] و بسیاری موارد دیگر می‌تواند منجر به تغییرات شوری در منطقه‌ای خاص یا در کل محدوده خلیج فارس شود که مطالعه این سناریوها و اندرکنش پارامترهای دخیل در آن، مدنظر این مطالعه نیست و تمرکز اصلی بر تأثیر تبخیر بر میزان شوری بوده است. پس، هدف این مطالعه بررسی نقش تبخیر به عنوان یک متغیر اقلیمی مهم در اقلیم دریایی و تأثیر آن بر شوری و فرآیندهای تبادل آب در خلیج فارس است و در این راستا از مدلسازی عددی استفاده می‌شود. در ادامه، ابتدا معادلات حاکم تشریح شده و پس از درستی آزمایشی مدل عددی، نتایج مهم نشان داده شده است. در انتها نیز جمع‌بندی مطالب ارائه می‌شود.

پیروی می‌کند:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{H} + T_s S \quad (7)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (8)$$

در معادله فوق ترم‌های پخش دما و شوری طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$(F_T, F_s) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (9)$$

در حل معادلات آشفتگی با مدل  $k-\varepsilon$  ویسکوزیته گردابی از پارامترهای آشفتگی  $k$  و  $\varepsilon$  بدست می‌آید:

$$v_t = \frac{c_u k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$k$  و  $\varepsilon$  از حل معادلات انتقال زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (12)$$

## ۲-۲- مشخصات مدل عددی

محدوده مطالعات شامل خلیج فارس و دریای عمان می‌باشد. این ناحیه با استفاده از شبکه‌بندی نامنظم با  $9233$  المان و  $5083$  گره در سطح افقی مدل شده است. شبکه‌بندی عمودی این مدل به صورت  $10$  لایه سیگما و  $10$  لایه  $z$ -level تعریف شده است.

در این تحقیق مدلسازی از فصل زمستان شروع شده است زیرا در این فصل دمای ستون آب نسبتاً یکنواخت می‌باشد. تراز اولیه سطح آب، شوری و دمای اولیه مدل در سه بعدی محیط خلیج فارس و دریای عمان از مدل هیدرودینامیک HYCOM<sup>1</sup> با تفکیک مکانی  $0.08 \times 0.08$  درجه جغرافیایی استخراج شده و به مدل مایک معرفی شده است.

همچنین داده‌های مربوط به تبخیر آب از نوع ERA5 از خلیج فارس از پایگاه داده ECMWF دریافت شده است.

این داده‌ها از تلفیق داده‌های دیدبانی با داده‌های مدل‌های عددی به دست آمده است. در نهایت شبیه‌سازی برای  $8$  سال از سال  $2012$  انجام شده است تا نتایج شبیه‌سازی با گذر زمان به مرحله پایدار برسد و خروجی مدل در سال انتهایی مدل‌سازی اختلاف اندک با سال ماقبل خود داشته باشد. این روند در شکل‌های (۱ و ۲) نشان داده شده است.

لازم به توضیح است که پارامتر تبخیر در طبیعت تابعی از عوامل اقلیمی دیگر مانند دما، باد، رطوبت، میزان تابش، تغییرات بلند مدت تراز سطح اقیانوس‌ها و غیره است و در عمل، ترکیبات متنوعی از این پارامترها می‌تواند منجر به تبخیرهای مختلف یا یکسان شود. مدلسازی چند ترکیب مختلف نشان داد که شرایطی که منجر به یک مقدار مساوی تبخیر می‌شوند، خروجی شوری یکسانی را نیز دارند. به عبارت دیگر، میزان تبخیر تاثیر مستقیم و موثری بر میزان شوری مدلسازی شده داشته و تاثیر سایر پارامترها در قیاس با آن قابل صرف‌نظر است. از آنجایی که هدف این مطالعات بررسی سناریوهای مختلف اقلیمی و تاثیر سنجی پارامترهای مختلف نبوده است، برای بررسی دقیق‌تر اثر تبخیر بر تغییرات شوری، مقدار تبخیر در ابتدا به صورت ورودی به مدل معرفی و سپس حساسیت شوری نسبت به تغییرات تبخیر با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، ارزیابی شده است اگرچه مطابق توضیحات فوق و حساسیت سنجی انجام شده، با توجه به اعمال تبخیر به عنوان ورودی، تغییر سایر پارامترها نیز در مقدار تبخیر و در نتیجه در خروجی مدل تاثیر چندانی ندارد.

## ۲-۳- تبادل حرارت<sup>۲</sup> بین اتمسفر و محیط آبی

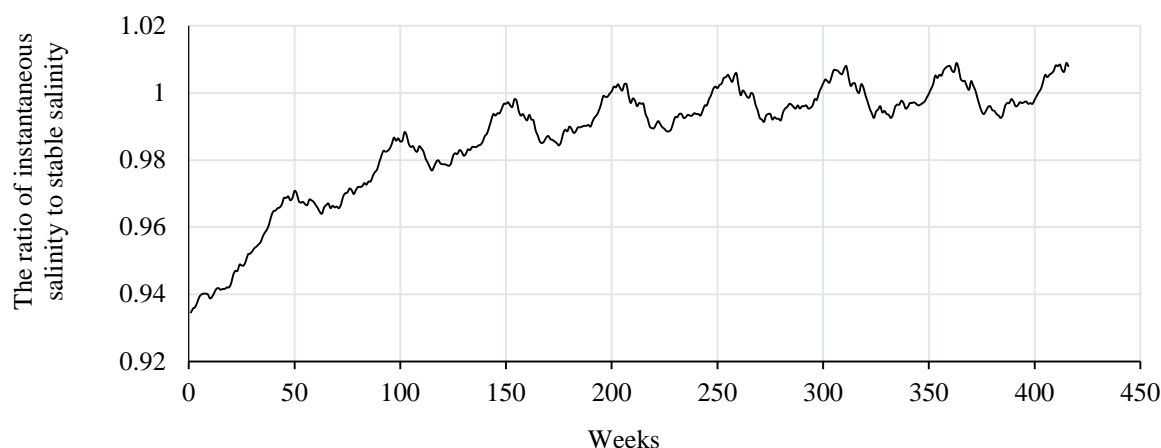
تبادل حرارت محیط آب با اتمسفر از چهار طریق صورت می‌گیرد. داده‌های مورد نیاز این بخش عبارتند از: دمای هوا در ارتفاع دو متر بالای سطح دریا، رطوبت نسبی و صاف بودن آسمان. تمام داده‌های مذکور از پایگاه داده‌های اقلیمی کوپرنیکس<sup>۳</sup> با تفکیک مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه جغرافیایی و گام زمانی  $3$  ساعته برای کل دوره مدلسازی  $5$  ساله دریافت شد و بعد از پیش پردازش به مدل مایک اعمال شد.

2- Heat Exchange

3- <https://cds.climate.copernicus.eu>

1- <https://www.hycom.org>

شکل ۱. نسبت میانگین شوری لحظه‌ای به شوری پایدار در سطح خلیج فارس در مدل سازی ۸ ساله

Fig. 1. Instantaneous average salinity ratio to stable salinity of the PG surface water  $S_i/S_s$  during 8-year simulation

شکل ۲. میانگین دمای آب سطح خلیج فارس در مدلسازی ۸ ساله

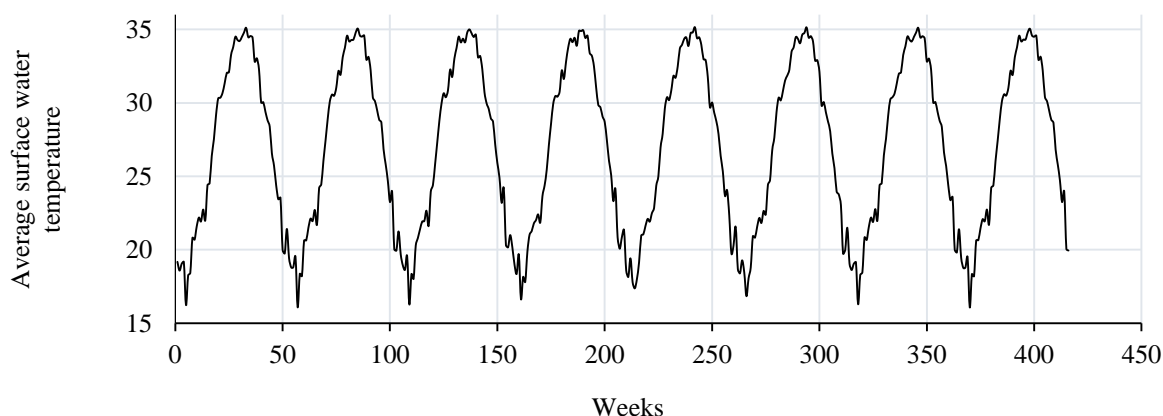


Fig. 2. Average surface water temperature of the PG during 8-year simulation

## ۲-۴- شار حرارت محسوس

تبادل شار حرارت محسوس از طریق انتقال دمایی اتمسفر به دریا و برعکس در از طریق سطح دریا به عنوان لایه بین فاز گازی اتمسفر و فاز مایع اقیانوس صورت می‌گیرد. در نرم‌افزار مایک برای لحاظ کردن شار حرارت محسوس از ضرایبی تحت عنوان ضریب تبادل گرم کننده<sup>۱</sup> و ضریب تبادل سرد کننده<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در این تحقیق پس از بررسی مطالعات پیشین [16] و حساسیت سنجی‌های متعدد، ضریب تبادل گرم کننده 0.33 و ضریب تبادل سرد کننده 0.44 تعریف شد.

## ۲-۵- تشعشع خالص موج کوتاه

تشفشع خالص موج کوتاه از رابطه زیر بدست می‌آید [17]:

$$q_{sr,net} = (1 - \alpha)q_s \quad (13)$$

در رابطه فوق  $q_s$  تشعشع خورشید،  $\alpha$  ضریب انعکاس است و بستگی به فاصله نقطه مورد نظر از خط استوا دارد. تشعشع خورشید مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$q_s = \left(\frac{H}{H_0}\right) q_0 (a_3 + b_3 \cos(\omega_i)) \frac{10^6}{3600} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴، ضرایب  $a_3$  و  $b_3$  به زاویه تابش خورشید بستگی دارد،  $q_0$  شدت تشعشعات فراخورشیدی،  $\omega_i$  زاویه ساعتی (که بستگی به مختصات نقطه مورد نظر روی کره

1- transfer coefficient for heating  
2- transfer coefficient for cooling

مربع، میزان تبخیر خالص سالیانه حجمی برابر 3.8057E11 متر مکعب داشته است.

در شکل‌های فوق اعداد مثبت نشانگر بارندگی و اعداد منفی نشانگر تبخیر آب می‌باشد. با توجه به میانگین‌های فصلی تبخیر خالص آب، مشاهده می‌شود تبخیر آب در فصل زمستان بیشتر از فصل تابستان است و علت این موضوع سرعت بیشتر باد در فصل زمستان نسبت به فصل تابستان است و اثر سرعت باد در تبخیر آب بیشتر از اثر گرما می‌باشد.

#### ۲-۷- رودخانه‌های منتهی به خلیج فارس

اطلاعات دبی، شوری و دمایی که آب رودخانه‌های منتهی به خلیج فارس وارد می‌کنند مطابق تحقیقات پیشین جمع‌آوری و به مدل معرفی شده است [1، 19، 20].

#### ۳- درستی آزمایشی

درستی آزمایشی مدل هیدرودینامیک با استفاده از مقایسه خروجی مدل با داده‌های مدل پیش‌بینی جهانی مایک برای تراز سطح آب و TPXO برای سرعت جریان انجام شد. مختصات نقاط واسنجی مدل در جدول (۱) و مقایسه تاریخچه زمانی این نقاط در شکل‌های (۷ تا ۱۲) آمده است.

جدول ۱. مختصات نقاط واسنجی شبیه‌سازی

points	Latitude (Degree)	Longitude (Degree)
p2	27.63258	52.07376
p3	26.50688	54.32516

Table 1. Coordinates of simulation calibration points

#### ۴- نتایج

تبخیر یکی از مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی است که خلیج فارس را به یکی از شورترین آب‌های آزاد جهان تبدیل کرده است. تبخیر به عواملی مانند دمای هوا، باد، رطوبت نسبی، پوشش ابر و غیره بستگی دارد. در این تحقیق صرف‌نظر از عوامل تبخیر آب، اثر تشدید تبخیر آب بر دما و شوری خلیج فارس می‌پردازیم. ابتدا فایل مربوط به داده‌های تبخیر آب به میزان ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش داده شد و حساسیت پارامتر شوری آب در ناحیه مورد مطالعه با توجه به خروجی‌های شبیه‌سازی عددی سنجیده شد.

زمین دارد)،  $H$  میزان تشعشع روزانه در حالت آسمان ابری است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{H}{H_0} = a_2 + b_2 \frac{n}{n_d} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵،  $H_0$  میزان تشعشع در سطح زمین است که بستگی به مختصات نقطه مورد نظر و زاویه تابش خورشید در آن نقطه دارد و  $\frac{n}{n_d}$  نسبت تعداد ساعات آفتابی به بیشترین تعداد ساعات آفتابی است. ضریب  $a_2$  و  $b_2$  در قانون آنگستروم که میزان اثر ابری بودن آسمان در تشعشع تابیده شده به سطح آب دریا را تنظیم می‌کند که در نتیجه حساسیت سنجی‌های انجام شده، مقادیر پیش فرض مایک یعنی  $b_2 = 0.371$  و  $a_2 = 0.295$  برای لحاظ کردن اثر شدت نور خورشید در ستون آب طبق قانون Beer ضرایب  $\beta = 0.25$  و  $\gamma = 1$  خروجی‌های با دقت کافی مطابق با اندازه‌گیری‌های کشتی‌میشه<sup>۱</sup> را نتیجه دادند. ضریب  $\beta$  کمیتی است که درصد انرژی نور جذب شده در نزدیکی سطح آب را در نظر می‌گیرد و  $\gamma$  ضریب میرایی نور است.

#### ۲-۶- تشعشع خالص موج بلند

تشعشع خالص موج بلند مطابق رابطه برنت<sup>۲</sup> به صورت زیر می‌باشد [18]:

$$q_{lr,net} = -\sigma_{sb}(T_{air} + T_k)^4(a - b\sqrt{e_d})(c + d\frac{n}{n_d}) \quad (16)$$

در رابطه ۱۶،  $e_d$  فشار بخار،  $n$  تعداد ساعت‌های تابش آفتاب،  $n_d$  بیشترین ساعت‌های تابش آفتاب،  $T_k$ ،  $\sigma_{sb}$ ،  $c$ ،  $d$ ،  $b$  و  $a$  ضرایب ثابت،  $T_{air}$  دمای هوا و برابر با 273.15 درجه کلون است.

با کسر کردن مقدار بارش از تبخیر که این داده‌ها از سایت مرکز پیش‌بینی آب و هوای اروپا ECMWF دریافت شده‌اند، نرخ تبخیر خالص بدست آمد و در قالب فایل ورودی به نرم‌افزار معرفی شد. نرخ تبخیر خالص فصلی در شکل‌های (۳ تا ۶) آمده است. با توجه به این داده‌ها نرخ خالص تبخیر در سال ۲۰۱۶ برابر با 1.59 متر بوده است. با توجه به مساحت سطح خلیج فارس 2.4E5 کیلومتر

1- Mt. Michael  
2- Brunt's equation

شکل ۳. میانگین تبخیر خالص آب خلیج فارس و دریای عمان در فصل بهار

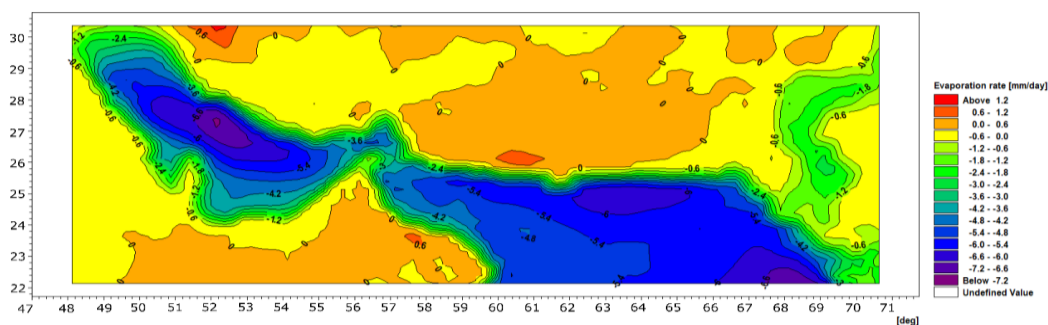


Fig. 3. Average net evaporation of Persian Gulf and Sea of Oman water in spring

شکل ۴. میانگین تبخیر خالص آب خلیج فارس و دریای عمان در فصل تابستان

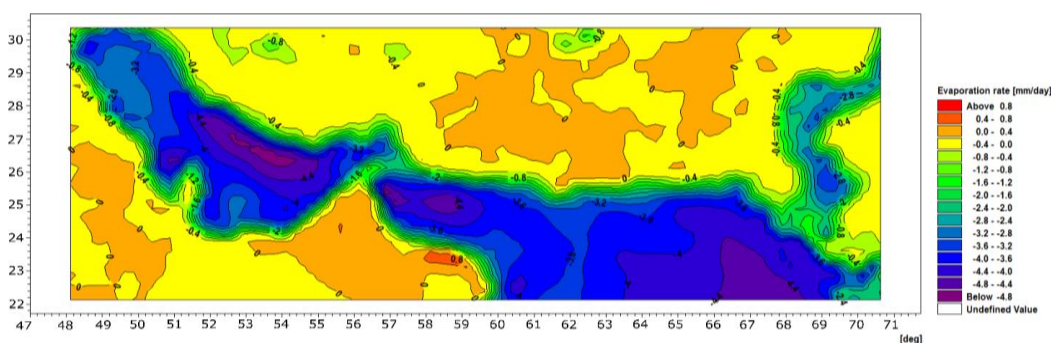


Fig. 4. Average net evaporation of Persian Gulf and Sea of Oman water in summer

شکل ۵. میانگین تبخیر خالص آب خلیج فارس و دریای عمان در فصل پاییز

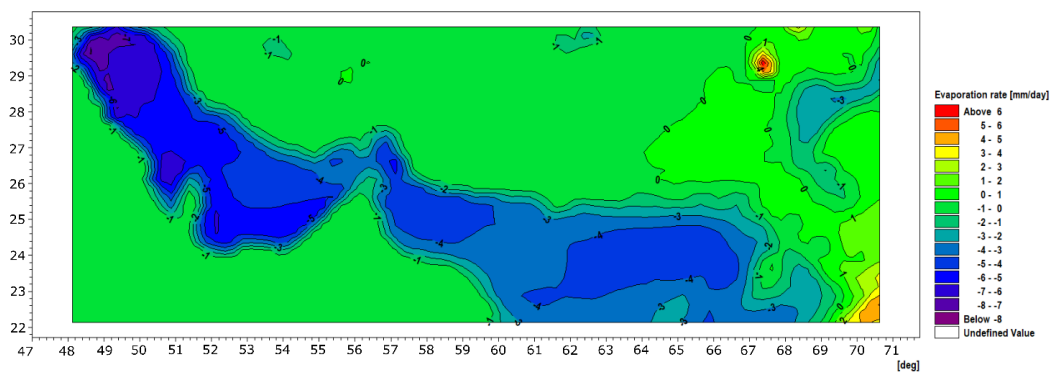


Fig. 5. Average net evaporation of Persian Gulf and Sea of Oman water in fall

شکل ۶. میانگین تبخیر خالص آب خلیج فارس و دریای عمان در فصل زمستان

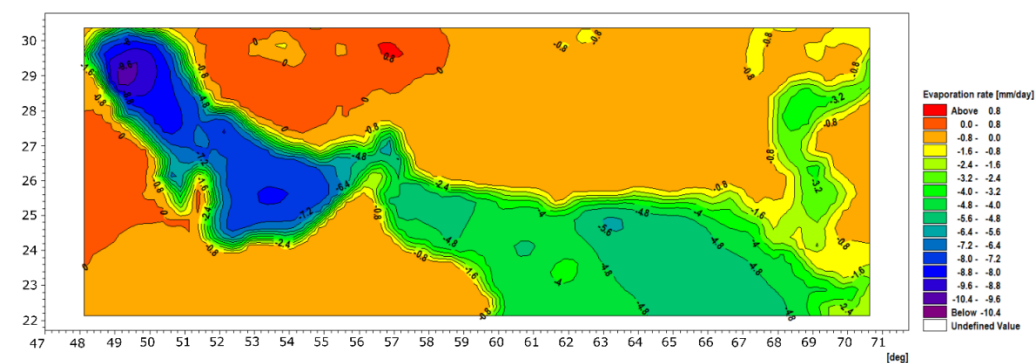


Fig. 6. Average net evaporation of Persian Gulf and Sea of Oman water in winter



شکل ۷. مقایسه تراز سطح آب حاصل از خروجی شبیه سازی با مدل پیش بینی مایک در نقطه p1

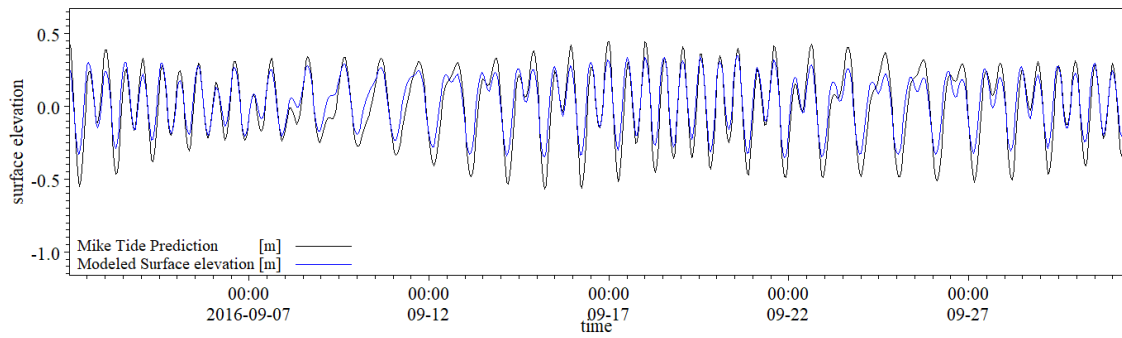


Fig. 7. Comparison of the water level resulting from the simulation output with Mike's prediction model at point p1

شکل ۸. مقایسه تراز سطح آب حاصل از خروجی شبیه سازی با مدل پیش بینی مایک در نقطه p2

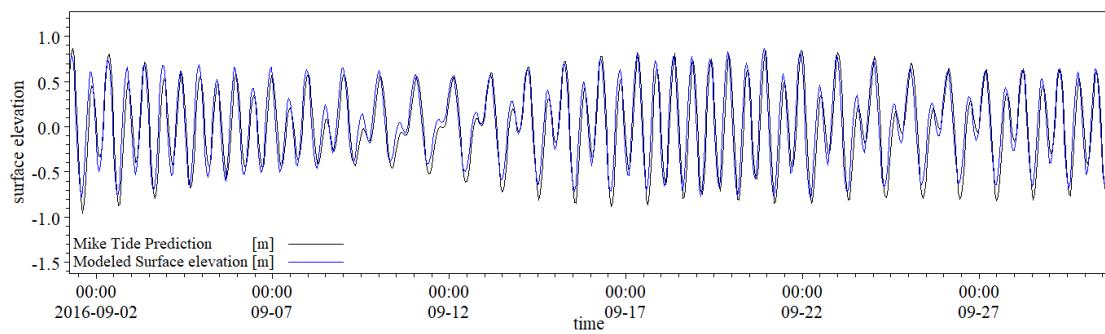


Fig. 8. Comparison of the water level resulting from the simulation output with Mike's prediction model at point p2

شکل ۹. مقایسه تراز سطح آب حاصل از خروجی شبیه سازی با مدل پیش بینی مایک در نقطه p3

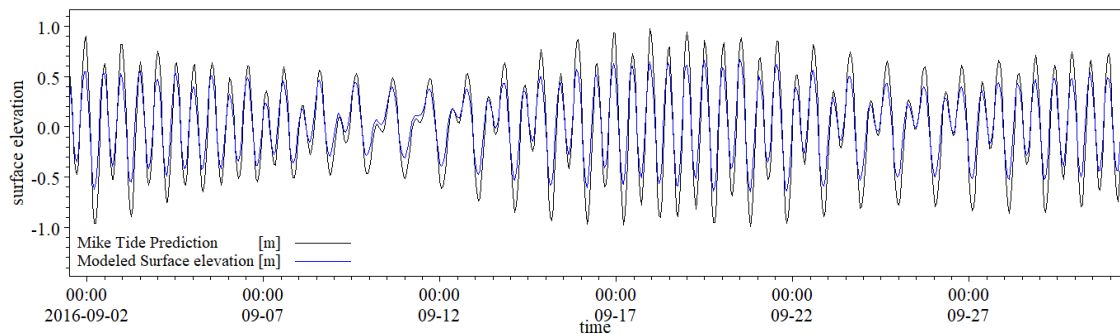


Fig. 9. Comparison of the water level resulting from the simulation output with Mike's prediction model at point p3

شکل ۱۰. مقایسه سرعت جریان آب حاصل از خروجی شبیه سازی با مدل پیش بینی مایک در نقطه p1

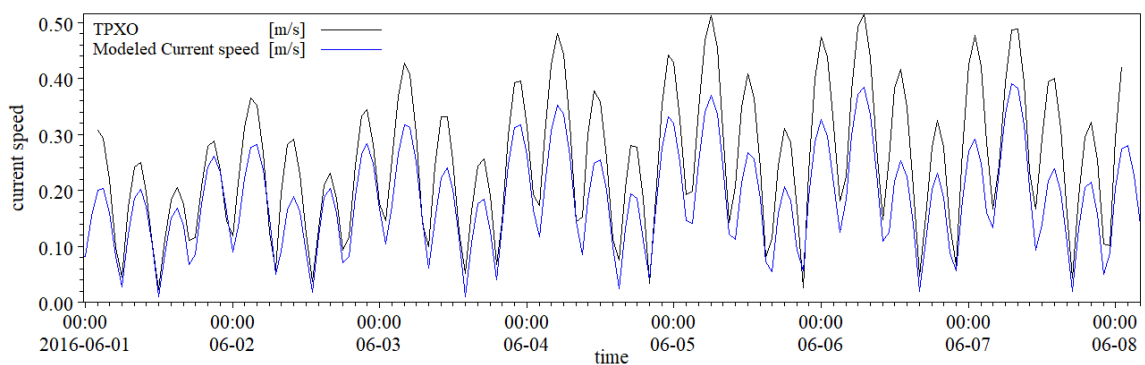


Fig. 10. Comparison of the water flow rate resulting from the simulation output with Mike's prediction model at point p1

شکل ۱۱. مقایسه سرعت جریان آب حاصل از خروجی شبیه سازی با مدل پیش بینی مایک در نقطه p2

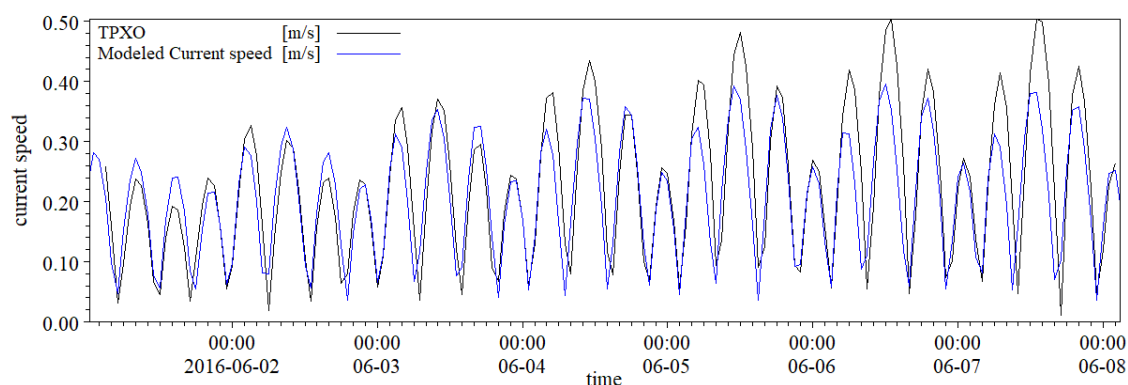


Fig. 11. Comparison of the water flow rate resulting from the simulation output with Mike's prediction model at point p2

شکل ۱۲. مقایسه سرعت جریان آب حاصل از خروجی شبیه سازی با مدل پیش بینی مایک در نقطه p3

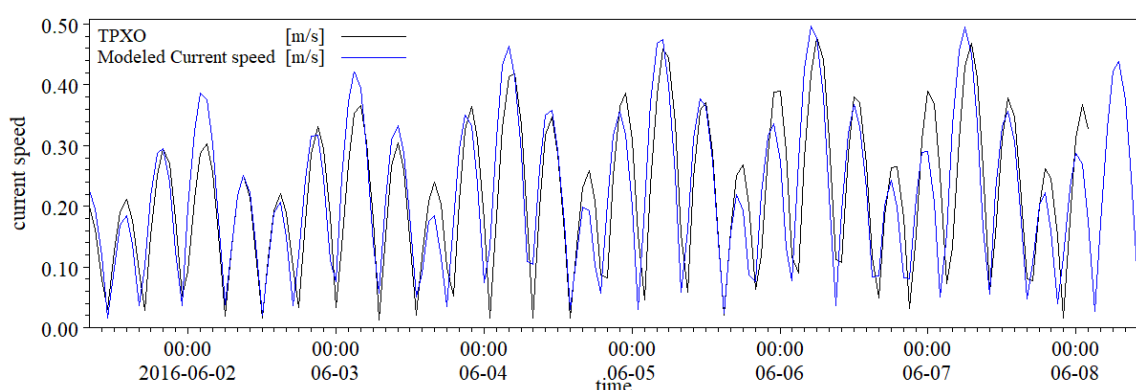


Fig. 12. Comparison of the water flow rate resulting from the simulation output with Mike's prediction model at point p3

جدول ۱. نتایج مقایسه آماری شبیه سازی با مدل های پیش بینی

Points	Current speed			Water Elevation		
	Index of agreement	C.C.	RMSE(m/s)	Index of agreement	C.C.	RMSE(m)
p1	0.7738	0.9531	0.0824	0.9646	0.9429	0.0992
p2	0.8069	0.7953	0.0529	0.9433	0.9689	0.131
p3	0.8770	0.8263	0.0702	0.9447	0.9798	0.1761

Table 2. Results of statistical comparison of simulation with prediction models

شکل ۱۳. شوری میانگین سطح خلیج فارس با تغییر نرخ تبخیر

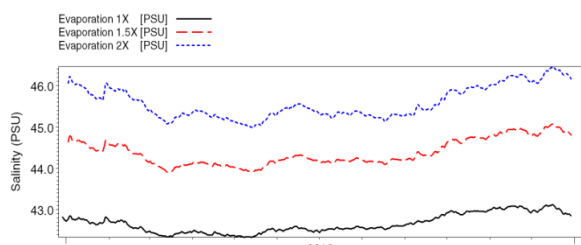


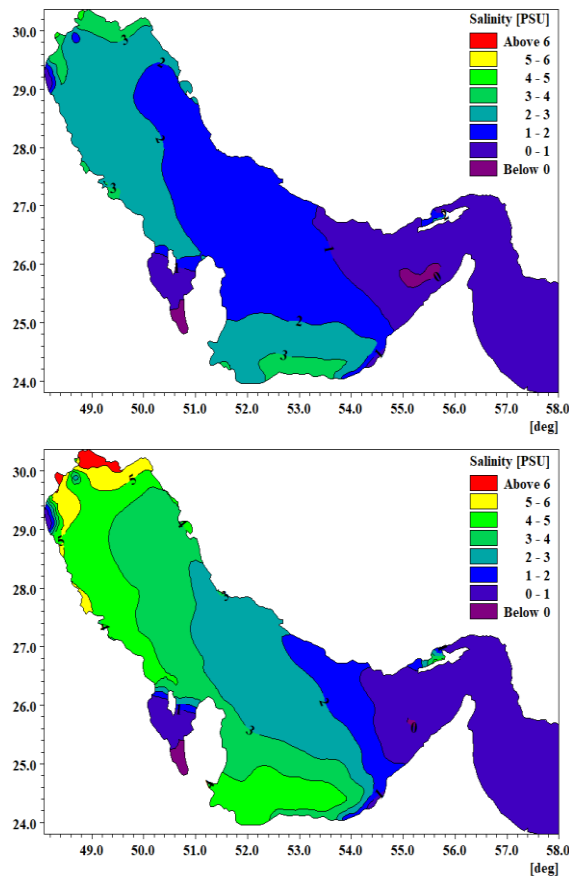
Fig. 13. The average salinity of the surface of the Persian Gulf with the change of evaporation rate

بر اساس سطوح تبخیر مدلسازی شده، به نظر می رسد رابطه ای خطی بین افزایش تبخیر و میانگین شوری سالیانه وجود دارد به گونه ای که با دو برابر شدن میزان تبخیر،

فایل خروجی شبیه سازی حاوی داده های شوری محاسبه شده ی آب در لایه های عموی مختلف و با شبکه بندی افقی نامنظم می باشد. ابتدا لایه سطحی این داده ها توسط نرم افزار Mike به صورت یک ماتریس با سلول های هم اندازه و شبکه منظم درون یابی شد. سپس به صورت فایل متنی ASCII ذخیره شد تا بتوان داده های شوری و دما را در برنامه ای که با زبان فرترن به منظور محاسبه میانگین مکانی این داده ها در کل دامنه خلیج فارس تا تنگه هرمز نوشته شد، فراخوانی کرد.

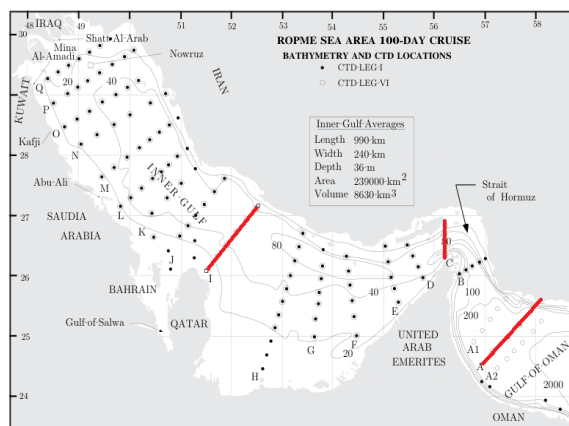


شکل ۱۴. میانگین تفاضل شوری سطح آب خلیج فارس: نمودار بالا در حالت ۵۰ درصد و نمودار پایین در حالت ۱۰۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی



**Fig. 14.** The average salinity difference of the water surface of the Persian Gulf: the upper graph in the 50% state and the lower graph in the 100% state, the increase in evaporation compared to the natural state

شکل ۱۵. موقعیت مقاطع اندازه‌گیری پروفایل قائم دما و شوری در [1]



**Fig. 15.** The location of the measurement sections of the vertical profile of temperature and salinity in [1]

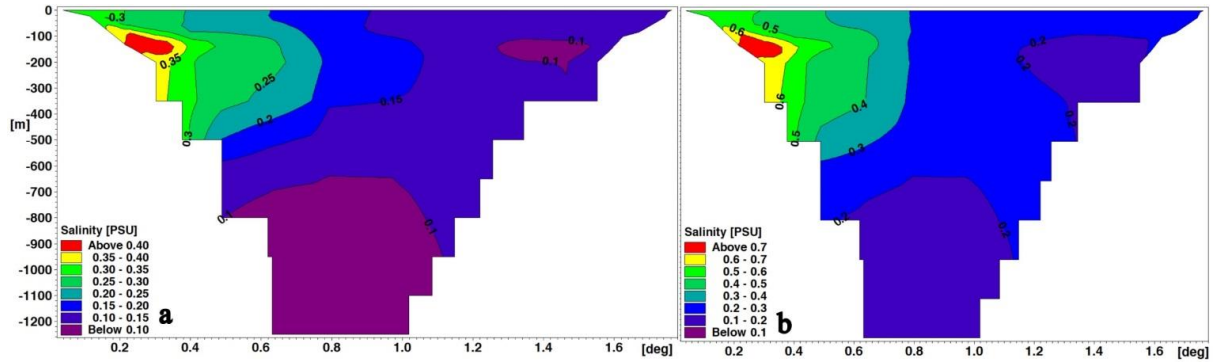
میانگین شوری از حدود ۴۲ تا ۴۵٫۵ psu افزایش یافته است. برای بررسی جامع‌تر اثر تبخیر بر محیط دریا، تفاضل شوری و دما در هر یک از حالت‌های افزایش تبخیر نسبت به حالت تبخیر معمولی افزایش نیافته مقایسه شد و میانگین این تفاضل  $(SIM_t - SIM_1)$  محاسبه شد و در شکل‌های زیر نمایش داده شده است.

طبق شکل‌های (۱۴ و ۱۵) اثر افزایش تبخیر بر شوری سطح آب کاملاً مشخص می‌باشد. در تمام حالت‌ها نواحی نزدیک‌تر به تنگه هرمز به دلیل بهره‌مندی از آب کم‌شورتر وارد شده از دریای عمان اثر کمتری از افزایش تبخیر گرفته‌اند و افزایش شوری در نواحی کم عمق شمالی و سواحل جنوبی موجب افزایش میانگین شوری خلیج فارس شده است. سواحل شمالی اما به دلیل جریان آب ورودی از سمت دریای عمان و سرعت بالاتر جریان آب در این سواحل نسبت به نواحی جنوبی، کمتر در معرض تغییرات شوری ناشی از افزایش تبخیر آب قرار گرفته‌اند.

همچنین باتوجه به سه بعدی بودن شبیه‌سازی، نمایش مقطع قائم شوری آب خلیج فارس روش مناسبی برای مقایسه و ارزیابی اثر تبخیر بر شوری آب است. برای اینکار با توجه به شکل زیر مقاطع A، C، I و A مانند روشی که رینولدز [1] برای نمایش سه بعدی شوری آب استفاده کرده بود؛ انتخاب شد.

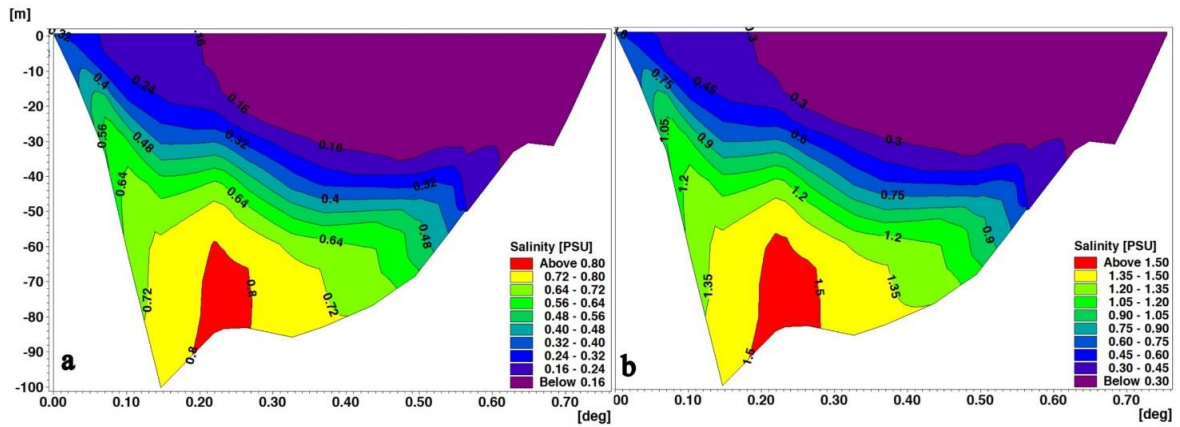
شکل (۱۶) افزایش اندک شوری آب به میزان حداکثر 0.4 psu به ازای افزایش ۵۰ درصدی تبخیر آب و 0.7 psu به ازای افزایش ۱۰۰ درصدی تبخیر آب را نشان می‌دهد. بیشترین افزایش شوری در هر دو حالت a و b در نزدیکی سواحل غرب دریای عمان اتفاق افتاده‌اند. دلیل اثر پذیری اندک دریای عمان از افزایش تبخیر آب، را می‌توان پویایی بیشتر جریان‌های آن ناحیه و عمق بیشتر آن نسبت به خلیج فارس نسبت داد.

شکل ۱۶. میانگین تفاضل شوری پروفایل قائم آب خلیج فارس در مقطع A؛ (a) در حالت ۵۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی (b) در حالت ۱۰۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی



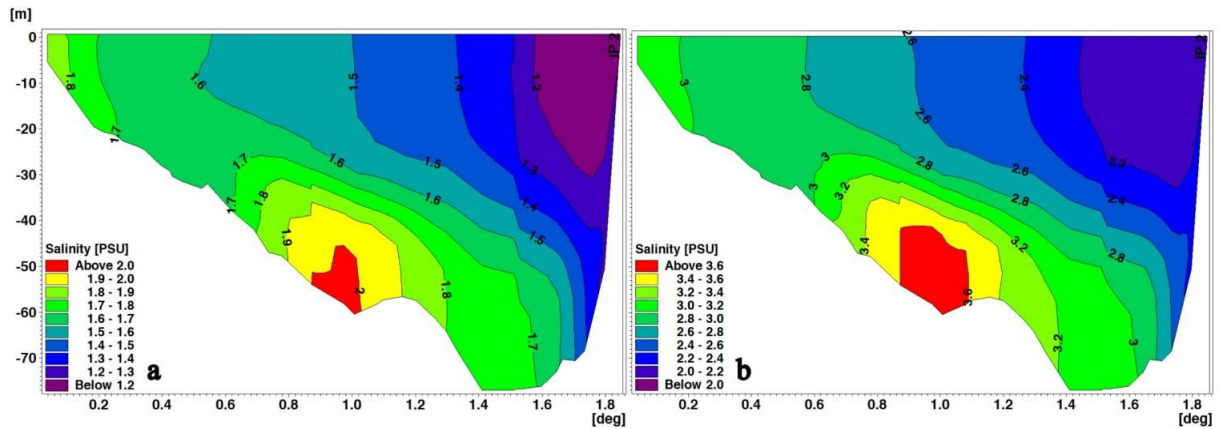
**Fig. 16.** The average salinity difference of the vertical profile of Persian Gulf water in section A; (a) in the case of 50% increase in evaporation compared to the normal state (b) in the case of 100% increase in evaporation compared to the normal state

شکل ۱۷. میانگین تفاضل شوری پروفایل قائم آب خلیج فارس در مقطع C؛ (a) در حالت ۵۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی (b) در حالت ۱۰۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی



**Fig. 17.** The average salinity difference of the vertical profile of Persian Gulf water in section C; (a) in the case of 50% increase in evaporation compared to the normal state (b) in the case of 100% increase in evaporation compared to the normal state

شکل ۱۸. میانگین تفاضل شوری پروفایل قائم آب خلیج فارس در مقطع I؛ (a) در حالت ۵۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی (b) در حالت ۱۰۰ درصد افزایش تبخیر نسبت به وضعیت طبیعی



**Fig. 18.** The average salinity difference of the vertical profile of Persian Gulf water in section I; (a) in the case of 50% increase in evaporation compared to the normal state (b) in the case of 100% increase in evaporation compared to the normal state

جدول ۲. حجم آب ورودی به خلیج فارس با توجه به مقادیر مختلف تبخیر آب سطح خلیج فارس

	Pos. Acc. discharge, Flow		diff	
	m <sup>3</sup> /year	sv	m <sup>3</sup> /year	sv
normal	1.60322E+13	0.5084	-	-
evap X 1.25	1.61139E+13	0.5110	8.17E+10	0.0025907
evap X 1.5	1.61882E+13	0.5133	1.56E+11	0.0049467
evap X 2	1.63356E+13	0.5180	3.03E+11	0.0096208

**Table 3.** The volume of water entering the Persian Gulf according to the different amounts of water evaporation on the surface of the Persian Gulf

بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش تبخیر آب از سطح خلیج فارس اثر شدیدی در شوری خلیج فارس دارد به گونه‌ای که افزایش ۵۰ درصدی و ۱۰۰ درصدی تبخیر به ترتیب موجب افزایش میانگین شوری آب خلیج فارس به میزان حدود 3 psu و 6 psu می‌شود. البته این اثر در سطح خلیج فارس متفاوت و گسترده است به گونه‌ای که با توجه به عمق آب و همچنین جهت گردش جریان در خلیج فارس، تأثیر تبخیر آب بر افزایش شوری در نواحی جنوبی خلیج فارس و همچنین سواحل کم عمق تر شمالی بیشتر بوده و لیکن در مرکز و نیمه شمالی خلیج فارس، این تأثیر کمتر است. همچنین نواحی نزدیکتر به تنگه هرمز به دلیل تبادل بیشتر با دریای عمان، اثر کمتری از افزایش تبخیر گرفته‌اند. از آنجایی که با روند گرمایش زمین و احتمال خشکسالی، افزایش تبخیر می‌تواند منجر به شورتر شدن آب شود، بررسی جامع‌تر اثر این پدیده بر شناخت دقیق تر رفتار اقلیمی خلیج فارس اهمیت بسزایی دارد.

#### ۶- مراجع

- [1] R. Michael Reynolds, "Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman-Results from the Mt Mitchell expedition," Mar. Pollut. Bull., vol. 27, no. C, pp. 35-59, 1993, doi: 10.1016/0025-326X(93)90007-7.
- [2] A. H. Meshal and H. M. Hassan, "Evaporation from the coastal water of the central part of the Gulf," Arab Gulf J. Sci. Res., vol. 4, no. 2, pp. 649-655, 1986.
- [3] E. K. Paleologos, M. T. Al Nahyan, and S. Farouk, "Risks and threats of desalination in the Arabian Gulf," IOP Conf. Ser. Earth

طبق شکل (۱۷) افزایش تبخیر آب از سطح خلیج فارس باعث افزایش قابل ملاحظه شوری آب خروجی خلیج فارس در تنگه‌ی هرمز می‌شود. افزایش ۵۰ درصدی تبخیر آب سطح اقیانوس موجب افزایش 0.8 psu شوری و افزایش ۱۰۰ درصد تبخیر، موجب افزایش 1.5 psu شوری آب خروجی خلیج فارس می‌شود.

شکل (۱۸) میانگین تفاضل شوری پروفایل قائم آب در مقطع I خلیج فارس برای حالت افزایش تبخیر ۵۰ درصد، افزایش 1.98 psu و در حالت افزایش ۱۰۰ درصد تبخیر، افزایش 3.6 psu در میزان شوری آب نزدیک بستر را نشان می‌دهد. شوری آب در پروفایل قائم دارای لایه بندی تقریباً مایل است و اختلاف شوری در دو حالت کاملاً مشهود است. براساس این نتایج افزایش شوری آب ناشی از افزایش تبخیر آب خلیج فارس در سواحل جنوبی شدیدتر از سواحل شمالی است. کم عمق بودن نواحی نزدیک به سواحل جنوبی، این ناحیه را مستعد اثر پذیری از تبخیر کرده است.

#### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

خلیج فارس یک خلیج نیمه بسته و کم عمق است [21] که در نزدیکی خط حاره شمالی واقع شده است و تنها از طریق تنگه‌ی هرمز با دریای عمان تبادل آب دارد و محیط بسته آن به همراه مقادیر قابل توجه تبخیر آن را به یکی از خلیج‌های با آب نسبتاً شور تبدیل کرده است. در این مطالعه، با در نظر گرفتن همزمان عوامل جزرو مد، باد، تبخیر و رودخانه‌ها شرایط تبادل آب خلیج فارس با دریای عمان مدلسازی و اثر میزان تبخیر بر تغییرات شوری آب خلیج فارس بررسی شد.

در جدول (۳) میزان آب ورودی به خلیج فارس با توجه به مقادیر مختلف تبخیر آب سطح خلیج فارس آمده است. درمی‌یابیم که با تبخیر آب دریا، حجم قابل توجهی آب از دریای عمان وارد خلیج فارس می‌شود تا جایگزین آب از دست رفته باشد. همچنین با افزایش این نرخ تبخیر، حجم آب ورودی به خلیج فارس نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد.

- [12] O. Mahpeykar, M.R. KHalilabadi, K. Kenarkoohi, "The study of the effect of Arvandroud on Persian Gulf Salinity change using MIKE model ", *Journal of Marine Science and Technology*, 2021, 20(3), pp. 50-65.
- [13] S. farrokhi mogaddam, A.A.i bidokhti, F. Ahmadi givi, M. Ezam, "Assessment of the physical variations (heat and salinity) of climate changes in the Persian Gulf Field data and Numerical Simulation", *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 2021; 31(1): 63-70.
- [14] DHI, "DHI MATLAB Toolbox: User Guide," vol. 19, 2014.
- [15] UNESCO, "The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater." UNESCO technical papers in marine science, p. 36, 1981.
- [16] H. Ghaemi Bajestani, M. Rahbani, S. Sharbati, "Investigating the Potentiality of Upwelling in the Coastal Area of Jask Headland". *Hydrophysics*, 2018; 4(1): 69-84.
- [17] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. British Columbia: Elsevier Inc, 1983. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>.
- [18] G. Lindh and M. Falkenmark, *Hydrologi : en inledning till vattenresursläran*. 1972.
- [19] A. Elhakeem, W. Elshorbagy, and T. Bleninger, "Long-term hydrodynamic modeling of the Arabian Gulf," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 94, no. 1–2, pp. 19–36, 2015, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.03.020.
- [20] J. Kämpf and M. Sadrinasab, "The circulation of the Persian Gulf: A numerical study," *Ocean Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 27–41, 2006, doi: 10.5194/os-2-27-2006.
- [21] B. Kamranzad, "Persian Gulf zone classification based on the wind and wave climate variability," *Ocean Eng.*, vol. 169, no. October, pp. 604–635, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.09.020.
- Environ. Sci., vol. 191, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/191/1/012008.
- [4] H. D. Ibrahim and Elfatih A.B. Eltahir, "Investigation of the Impact of Desalination on the Salinity of the Persian Gulf," *Massachusetts Institute of Technology*, 2017. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1721.1/113478>
- [5] H. D. Ibrahim and E. A. B. Eltahir, "Impact of Brine Discharge from Seawater Desalination Plants on Persian/Arabian Gulf Salinity," *J. Environ. Eng.*, vol. 145, no. 12, p. 04019084, 2019, doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001604.
- [6] O. Mahpeykar and M. Khalilabadi, "Numerical modelling the effect of wind on Water Level and Evaporation Rate in the Persian Gulf," vol. 5, no. 1, 2021.
- [7] W. E. Johns, F. Yao, D. B. Olson, S. A. Josey, J. P. Grist, and D. A. Smeed, "Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred heat and freshwater budgets of the Persian Gulf," *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 108, no. 12, 2003, doi: 10.1029/2003jc001881.
- [8] Shenn-Yu Chao, T. W. Kao, and K. R. Al-Hajri, "A numerical investigation of circulation in the Arabian Gulf," *J. Geophys. Res.*, vol. 97, no. C7, 1992, doi: 10.1029/92jc00841.
- [9] S. A. Swift and A. S. Bower, "Formation and circulation of dense water in the Persian/Arabian Gulf," *J. Geophys. Res. C Ocean.*, vol. 108, no. 1, pp. 4–1, 2003, doi: 10.1029/2002jc001360.
- [10] F. Yao and W. E. Johns, "A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation," *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 115, no. 11, pp. 1–17, 2010, doi: 10.1029/2009JC005781.
- [11] S. Pous, P. Lazure, and X. Carton, "A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability," *Cont. Shelf Res.*, vol. 94, pp. 55–70, 2015, doi: 10.1016/j.csr.2014.12.008.

## پیوست الف

نام	علامت	نام	علامت
مؤلفه‌های متعامد سرعت در راستای X و Y و Z	u, v, w	مؤلفه‌های مختصات کارتزین	x, y, z
کل عمق آب	$h = d + \eta$	زمان	t
تراز سطح آب	$\eta$	پارامتر کوریولیس	$f = 2\Omega \sin(\varphi)$
عمق آب ثابت	d	سرعت زاویه ای چرخش زمین	$\Omega$
شتاب جاذبه زمین	g	عرض جغرافیایی	$\varphi$
مؤلفه‌های تانسور تنش تشعشعی	$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$	چگالی آب	$\rho$
فشار اتمسفر	$P_a$	لزجت گردابه عمودی	$\nu_t$
مقدار تخلیه در نقطه منبع	S	چگالی اولیه آب	$\rho_0$
تنش افقی در راستاهای X و Y	$F_u, F_v$	سرعت تخلیه آب به محیط آب در راستاهای X و Y	$u_s, v_s$
نرخ بارش و تبخیر	$\hat{P}$ و $\hat{E}$	لزجت گردابه افقی	A
مؤلفه‌های تنش سطحی آب با باد در راستای X و Y	$\tau_{sx}, \tau_{sx}$	مؤلفه‌های تنش سطحی آب با بستر دریا در راستای X و Y	$\tau_{bx}, \tau_{bx}$
ضریب پخش آشفتگی در راستای عمود	$D_v$	سرعت‌های میانگین گیری شده در عمق	$\bar{u}$ و $\bar{v}$
منبع تبادل گرما با اتمسفر	$\hat{H}$	ترم پخش افقی دما و شوری	$F_T, F_S$
شار خالص حرارت در سطح آب	$Q_n$	ضریب پخش افقی	$D_h$
شار حرارت پنهان	$q_v$	حرارت ویژه آب = $4217 \text{ J/(kg.K)}$	$c_p$
ویسکوزیته گردابی	$\nu_t$	گرمای نهان تبخیر آب = $2.5 \times 10^6$	$l_v$
اتلاف انرژی کینتیک آشفتگی	$\varepsilon$	انرژی کینتیک آشفتگی در واحد جرم	k
ضریب شناوری	B	ضریب برش	P
ضریب میرایی نور	$\lambda$	کسری از انرژی نور جذب شده نزدیک سطح آب	$\beta$
ضریب انتقال رطوبت = $1.32 \cdot 10^{-3}$	$C_e$	حرارت تبخیر = $2.5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$	L
چگالی تبخیر آب	$Q_{water}$	سرعت باد در ارتفاع ۲ متر بالای سطح آب	$W_{2m}$
		چگالی تبخیر آب در اتمسفر	$Q_{air}$

# Numerical modeling of the evaporation effect on the salinity of Persian Gulf

Samad Rasoulpour<sup>1</sup>, Hassan Akbari<sup>2\*</sup>, Ahmad Rezaei mazyak<sup>3</sup>

1. M.Sc. of marine structures, University of Tarbiat Modares. samad.rasoulpour@modares.ac.ir

2. Associate Professor, Department of marine structures, University of Tarbiat Modares. akbari.h@modares.ac.ir

3. PhD of marine structures, University of Tarbiat Modares. a.rezaemazyak@modares.ac.ir

Received: 2023/05/10

Accepted: 2024/02/28

## Abstract

The semi-closed geometry of the Persian Gulf and its location in a dry and desert area have caused evaporation as one of the most important climatic parameters affecting the water salinity and water exchange between Oman Sea and Persian Gulf. Since the global warming as well as the decrease of precipitation will increase the evaporation in future, it is very important to investigate the effect of this phenomenon on the salinity of the Persian Gulf and its effect on the facilities, especially the desalination plants in the Persian Gulf. Therefore, this research have been carried out with the aim of investigating the circulation of water in the Persian Gulf and evaluating the direct effect of water evaporation on salinity and water exchange with the Sea of Oman. In this regard, the hydrodynamic modeling by considering the effect of evaporation in the Oman Sea and the Persian Gulf has been done using the three-dimensional Mike3-Flow Model.

The input hydrodynamic data is extracted from the HYCOM model and the required atmospheric data is extracted from the ECMWF model. To evaluate and validate the model, numerical results have been compared with TPXO data and tidal levels by means of statistical parameters. The results of this study show that the amount of cumulative water entering the Persian Gulf has a relatively linear relationship with the percentage of evaporation. Also, the increase in water evaporation from the surface of the Persian Gulf has a strong effect on the salinity of the Persian Gulf, and this effect is widespread but variable in the surface of the Persian Gulf, so that the areas closer to the Strait of Hormuz are less affected by the increase in evaporation, and the increase in salinity in the shallow northern as well as in the southern coasts have caused an increase in the average salinity of the Persian Gulf. On average, a 50% increase in evaporation increases the water salinity by 3 psu and a 100% increase in evaporation causes an increase in water salinity by 6 psu.

**Keywords:** hydrodynamics; numerical simulation; Persian Gulf; evaporation; water salinity.