دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ دهم، شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۴۰۳)؛ صفحات ۱۵۷-۱۴۷

مقالهٔ پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.10.4

درصد همانندی: ۲٪

مدل‌سازی سه‌بعدی تخلیه پساب صنعتی در خلیج فارس و تحلیل اثرات هیدروفیزیکی آن

مهدی وحدتی محبوب[۱*]، سعید محمدی[۲]، محمدرضا خلیل‌آبادی[۳]

[۱*] نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. vahdatimm@student.pnu.ac.ir

[۲] استاد، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. mohammadi@pnu.ac.ir

[۳] دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. khalilabadi@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۴ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

چکیده

تخلیه آبگرم در محیط‌های دریایی به ویژه دریاهای نیمه‌بسته و خلیج‌ها، تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های هیدروفیزیکی و محیط زیست دریایی دارد. تخلیه آبگرم منجر به افزایش دمای سطح آب و در نتیجه کاهش چگالی آن می‌شوند. این تغییرات دما و به تبع آن تغییرات شوری توزیع مواد مغذی، مانند نیتروژن و فسفر، و اکسیژن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش میزان اکسیژن به‌ویژه در مناطق نزدیک به محل تخلیه آبگرم می‌تواند به کاهش کیفیت آب و از بین رفتن موجودات دریایی منجر شود. در خلیج فارس، که عمق کم و میزان تبخیر در آن بالاست، این تغییرات شدیدتر است و آثار مخرب‌تری برای اکوسیستم‌های دریایی در پی خواهد داشت. این اثرات زیست‌محیطی می‌تواند به بحران‌های اکولوژیکی منجر شود. بمنظور بررسی نوسانات به وجود آمده در ویژگی‌های هیدروفیزیکی آب دریا و جهت مدیریت دقیق تخلیه پساب‌ها در واحدهای صنعتی، طراحی بهینه و مدلسازی فرآیند تخلیه آبگرم جهت کاهش اثرات منفی بر محیط زیست ضروری است. راه‌حل‌هایی مانند استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده بسته، جلوگیری از تخلیه آب در مناطق حساس و طراحی مناسب برای اختلاط و پخش یکنواخت‌تر آبگرم، می‌تواند به کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و حفظ تعادل اکوسیستم‌های دریایی کمک کند. در مطالعه حاضر، برای بررسی و تحلیل نوسانات هیدروفیزیکیِ به وجود آمده در محل تخلیه پساب‌های گرم صنعتی در خلیج فارس از مدل نرم‌افزاری مایک استفاده شده است. در این شبیه‌سازی دو سناریو طراحی شده است که نشان می‌دهد ورود جریان خروجی واحدهای صنعتی به خلیج فارس تأثیر قابل ملاحظه و چشمگیری بر شرایط هیدروفیزیکی منطقه دارد.

واژه‌های کلیدی: خلیج فارس، تخلیه پساب، لایه‌بندی حرارتی، جزر و مد، مدلسازی سه‌بعدی.

۱. مقدمه

مراکز صنعتی حاشیه ساحلی خلیج فارس برای خنک سازی تاسیسات خود، حجم زیادی از آب دریا را برداشت کرده و پس از افزایش دما، آن را به محیط دریایی بازمی‌گردانند. این فرایند در دریاهای نیمه‌بسته و کم‌عمق، مانند خلیج فارس، می‌تواند موجب تغییرات چشمگیری در وضعیت حرارتی و هیدرودینامیکی شود. یکی از پیامدهای اصلی این تخلیه، ایجاد لایه‌بندی حرارتی است. این لایه‌بندی مانع از اختلاط عمودی آب شده و چرخه‌های طبیعی اکسیژن‌رسانی و انتقال مواد مغذی را مختل می‌کند. علاوه بر این، تخلیه پساب گرم صنعتی نه تنها می‌تواند لایه‌بندی موجود را تشدید کند، بلکه مدت آن را طولانی‌تر کرده و فرآیندهای اختلاط طبیعی بین لایه‌های سطحی و عمیق تر را به تاخیر می‌اندازد. در مناطقی که طبقه‌بندی معمولاً به دلیل اعماق کم یا اختلاط جزر و مدی قوی مشاهده نمی‌شود، افزودن آب گرم ممکن است باعث ایجاد الگوهای طبقه بندی جدید شود. چنین تغییراتی بر روی زیستگاه‌های محلی تأثیر گذاشته، مسیرهای زنجیره غذایی را مختل کرده و بر رفتار موجودات دریایی تأثیر مخرب می‌گذارد.

مطالعات متعددی در خصوص تحلیل تخلیه آب گرم و اثرات هیدروفیزیکی آن در خلیج فارس انجام شده است. یکی از این تحقیقات دکتر سیوف و همکاران، به مدل سازی تغییرات دما و شوری در آب‌های خلیج فارس با استفاده از مدل FVCOM پرداخته است [۱]. این مطالعه نشان داده است که تخلیه آب گرم می‌تواند بر ویژگی‌های هیدروفیزیکی همچون شوری و دما در این منطقه تأثیر گذارد، که به‌ویژه در نواحی ساحلی مهم است. علاوه بر این، تحقیقاتی در زمینه تغییرات فیزیکی آب‌های خلیج فارس در پی تغییرات اقلیمی توسط دکتر صدری‌نسب و همکاران انجام شده است که نشان می‌دهد تغییرات دما و شوری به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم می‌تواند توسط تخلیه آب گرم تشدید گردد[۲]. این تحقیقات تأکید دارند که تغییرات اقلیمی می‌تواند الگوهای جریان و شرایط اکولوژیکی را تغییر داده و اثرات تخلیه آب گرم را تشدید کند. به‌طور مشابه، در برخی مطالعات دیگر از جمله جمشیدی و همکاران به شبیه‌سازی اثرات تغییرات فصلی دما، شوری و چگالی در نواحی ساحلی پرداخته شده است[۳]. که نتایج آن برای ارزیابی تأثیرات تخلیه آب گرم در خلیج فارس نیز کاربردی است. همچنین، مطالعاتی که اثرات جریان‌های آبی در منطقه اروندرود بر شوری آب‌های خلیج فارس را مورد بررسی قرار داده‌اند توسط دکتر ماه‌پیکر و همکاران، نشان داده‌اند که این نوع جریان‌ها می‌توانند اثرات عمده‌ای بر تغییرات شوری ایجاد کنند [۴]. این نتایج می‌تواند به تحلیل تغییرات حاصل از تخلیه آب گرم و اثرات آن بر ویژگی‌های فیزیکی آب‌ها کمک کند.

در مطالعه حاضر، برای بررسی و تحلیل نوسانات ویژگی‌های هیدروفیزیکیِ آب دریا در محل تخلیه پساب‌های گرم صنعتی در خلیج فارس از دو سناریوی مقایسه‌ای استفاده شده است: (۱) سناریوی پایه بدون هرگونه تخلیه[1] آب گرم است، (۲) سناریوی مداخله‌ای که در آن جریان خروجی واحد صنعتی با دبی ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه به آب‌های خلیج وارد می‌شود. اهمیت این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که خلیج فارس به‌دلیل کم‌عمقی نسبی، تبخیر بالای سالانه، و رژیم گردش آبی محدود بسیار حساس به تغییرات چگالی ناشی از دما و شوری است؛ هر تغییر موضعی در دما یا شوری می‌تواند موجب تغییر در لایه‌بندیِ عمودی[2]، الگوهای همرفت و اختلاط، نوسانات جریان‌های محلی و انتقال مواد (مانند مواد مغذی و اکسیژن) شده و در نهایت بر محیط زیست، زیستگاه های دریایی و کیفیت آب تأثیر بگذارد. تحلیل موردنظر شامل تعیین مشخصه‌های اولیه و مرزی (دما و شوری پس‌زمینه، جریان های مدی و غیریکنواخت، باد و تبخیر)، شبیه‌سازی انتشار و گسترش زبانه حرارتیِ[3] خروجی تحت اثر شناوری و برهم‌کنش با جریان و تلاطم، و مقایسه مقادیر شاخص مانند افزایشی در دمای محلی(ΔT)، نابهنجاری شوری، ضخامت لایه گرادیانِ دما–شوری، و زمان ماند آب‌های تحت تأثیر است. به‌علاوه، اهمیت فصلی و فضایی (تأثیر شرایط فصل گرم مقابل سرد، تغییرات جزر و مد و الگوی باد) و نیز حساسیت نتایج نسبت به پارامترهای مدل‌سازی (ضریب نفوذ عمودی و افقی، نرخ خنک‌شوندگی

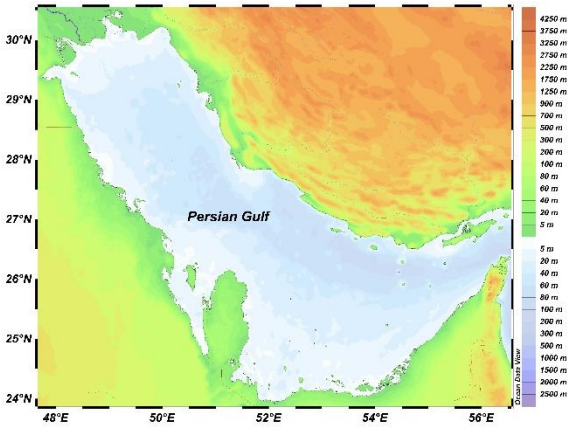
با اتمسفر، و نرخ مخلوط‌شدن توربولانسی) در نظر گرفته خواهد شد. خروجی این تحلیل می‌تواند هم برای ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و تعیین مناطق حساس، و هم برای تدوین معیارهای عملیاتی و حد مجاز دمایی/شوری، و طراحی برنامه‌های پایش و اصلاح‌های مهندسی جهت کاهش اثرات نامطلوب مورد استفاده قرار گیرد[۵].

انتخاب مدل Mike 3D در این مطالعه به دلیل توانایی آن در شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای سه‌بعدی انتقال حرارت و جریان‌های ناشی از جزر و مد بوده است. این نرم‌افزار با استفاده از معادلات ناویر–استوکس در قالب تفاضل محدود، امکان محاسبه دقیق پراکنش حرارتی و الگوهای اختلاط را فراهم می‌کند. در مقایسه با سایر مدل‌ها، مانند Delft3D یا ROMS، Mike 3D به دلیل انعطاف‌پذیری در تعریف شرایط مرزی و امکان ترکیب ماژول‌های هیدرودینامیکی، انتقال حرارت و کیفی آب انتخاب شد. در حالی که Delft3D بیشتر برای شبیه‌سازی‌های رسوب و مورفودینامیک به‌کار می‌رود و ROMS برای مطالعات جریان‌های حوضه‌ای و اقیانوسی مناسب‌تر است، Mike 3D دقت بالاتری در مدل‌سازی محلی زبانه‌های حرارتی واحدهای صنعتی ارائه می‌دهد[۶].

۲. مواد و روش‌ها

الف. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در این پژوهش، سواحل استان بوشهر در خلیج فارس است. این منطقه دارای عمق متوسط ۱۰ تا ۳۰ متر بوده و تحت تأثیر جزر و مد نیم‌روزی مختلط قرار دارد. ویژگی‌های هیدروفیزیکی این ناحیه باعث می‌شود تا هرگونه تغییر حرارتی ناشی از تخلیه واحد صنعتی به‌سرعت بر اکوسیستم محلی اثرگذار باشد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در خلیج فارس.

ب. داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل:

(۱) داده‌های دما و شوری که از پایگاه داده‌های اقیانوسی Hycom و برای مدت یک سال (۲۰۲۴–۲۰۲۵) با فرمت nc تهیه شد،

(۲) داده های جزر و مدی از وبسایت سازمان بنادر و دریانوردی بوشهر برای ایستگاه‌های ساحلی بوشهر تهیه شد، و

(۳) داده‌های توپوگرافی و بستر دریا از پایگاه داده‌های جهانی GEBCO به دست آمده است.

ج. سناریوهای شبیه‌سازی

در این پژوهش برای ارزیابی اثرات ورود جریان خروجی گرم به خلیج فارس، دو سناریوی اصلی در محیط نرم‌افزار مایک شبیه‌سازی شد تا بتوان تغییرات دما و شوری را به‌صورت مقایسه‌ای بررسی کرد. در سناریوی نخست، به‌عنوان سناریوی پایه یا مرجع تعریف گردید که در آن هیچ جریان خروجی واحد صنعتی وارد خلیج نشد و مدل تنها تحت تأثیر نیروهای طبیعی همانند جزر و مد، باد، تبخیر و تبادل گرما با اتمسفر اجرا شد. این سناریو تصویری از وضعیت عادی و طبیعی خلیج فارس فراهم می‌کند تا بتوان تفاوت‌های ناشی از تخلیه آب گرم را به‌روشنی شناسایی و تحلیل کرد. سناریوی دوم که سناریوی مداخله‌ای یا «با تخلیه آب گرم» نامیده شد، فرض شد یک واحد صنعتی جریان آب

گرم با دبی ثابت ۱۰۰ متر مکعب در ثانیه به خلیج فارس تخلیه می‌کند. این جریان، به دلیل دمای بالاتر نسبت به آب محیط و نیز تفاوت احتمالی در شوری، می‌تواند باعث تغییر لایه‌بندی و گرادیان‌های دما و شوری در آب‌های اطراف دهانه شود و به‌صورت زبانه‌ی از آب گرم در سطح یا لایه‌های بالایی گسترش یابد. در هر دو سناریو، تمامی نیروهای محیطی نظیر جزر و مد، دمای هوا، بارش، تبخیر و باد در مدل اعمال شدند تا شرایط واقعی‌تر جریان و اختلاط در خلیج بازتاب یابد. به این ترتیب، اثر خالص ورود آب گرم در کنار فرایندهای طبیعی تلاطم و تبادل گرما با جو محاسبه شد. در مقابل، با مقایسه نتایج این دو حالت، میزان تغییر دما و شوری ناشی از فعالیت واحد صنعتی در مناطق مختلف اطراف محل تخلیه و در لایه‌های عمقی مشخص شد و محدوده تأثیر زبانه حرارتی و تغییرات هیدروفیزیکی مرتبط با آن قابل ارزیابی گردید[۷–۹]. این سناریوها نشان می‌دهند که مدل مایک به‌خوبی قادر است نوسانات و تغییرات در شرایط هیدرودینامیکی متفاوت را بازتاب دهد و نقش تعیین‌کننده شدت جزرومد را در ایجاد یا از بین رفتن لایه‌بندی حرارتی آشکار سازد[۱۰].

د. مدلسازی

در این مطالعه از مجموعه نرم‌افزاری MIKE Zero با هسته مدل سه‌بعدی MIKE3Flow Model FM برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و انتقال دما و شوری در خلیج فارس استفاده شد[۱۰]. مدل حل‌کننده معادلات پیوستگی و مومنتوم میانگین‌گیری شده بر اساس معادلات ناویر استوکس[۴] و فرض هیدرواستاتیک است که معادلات انتقال دما و شوری را به‌صورت جابه‌جایی پخش[۵] مدل‌سازی می‌کند. شرایط مرزی شامل جزرومد، شار حرارتی بین سطح دریا و جو و جریان‌های پس‌زمینه لحاظ شد. مشخصات تخلیه واحد صنعتی بوشهر شامل دبی جریان و افزایش دمای آب خروجی نیز به‌عنوان ورودی به مدل اعمال گردید. گام‌های اصلی در این شبیه‌سازی عبارت‌اند از:

۱. آماده‌سازی هندسه و شبکه مدل: مدل شامل ناحیه اطراف محل تخلیه تا فاصله‌ای که اثرات زبانه حرارتی قابل تشخیص باشد، تعریف گردید. شبکه نامنظم[۶] برای نمایش دقیق خط ساحلی و ناهمگونی‌های باتیمتری استفاده شد و گرید عمودی مبتنی بر مختصات igmas در راستای عمق به‌کار گرفته شد.

۲. شرایط مرزی و اولیه: مرزهای مدل برای سطح و کناره‌ها با داده‌های جزر و مد و پروفیل‌های دما و شوری زمینه‌ای مشخص شدند. ورودی‌های جوی شامل باد، دما، رطوبت، تابش خورشیدی و فشار به‌صورت نیروی باد و شروط تبادل حرارتی سطحی وارد مدل شدند.

۳. مشخصات تخلیه آب گرم (سناریوی مداخله‌ای): در سناریوی مداخله‌ای، تخلیه آب گرم با دبی $Q = 100\ \mathrm{m^3/s}$ در نظر گرفته شد. دمای و شوری آب ورودی به‌عنوان شرایط ورودی تعیین شد و تحلیل حساسیت در رابطه با تغییرات دمایی و شوری انجام شد.

۴. پارامترسازی اختلاط و توربولانس: از مدل بستن توربولانسی استاندارد برای معادلات اختلاط استفاده شد و ضرایب پراکندگی افقی و عمودی برای تنظیم نتایج مدل به‌کار گرفته شدند.

۵. پارامترهای عددی و پایداری: حل بر روی شبکه انعطاف‌پذیر با روش حجم محدود انجام شد. گام‌های زمانی به‌گونه‌ای انتخاب شد که شرط CFL و پایداری عددی رعایت گردد. برای افزایش پایداری حل، از حلگرهای ضمنی در معادلات جریان استفاده شد[۱۱–۱۳].

۶. شبیه‌سازی‌های موردی و حساسیت: دو مجموعه شبیه‌سازی برای سناریوهای پایه (بدون تخلیه) و مداخله‌ای (با $Q = 100\ \mathrm{m^3/s}$) اجرا شد. همچنین شبیه‌سازی‌های حساسیت برای بررسی پاسخ مدل به تغییرات دمایی، شوری و ضرایب اختلاط انجام شد.

۷. کالیبراسیون و اعتبارسنجی: نتایج شبیه‌سازی با داده‌های میدانی و تصاویر حرارتی ماهواره‌ای مقایسه شد و پارامترهای حساس با استفاده از معیارهای مختلف مانند RMSE و ضریب همبستگی ارزیابی و تنظیم شدند.

۸ استخراج و تحلیل نتایج: خروجی های مدل شامل نقشه های فضایی-زمانی دما و شوری سطحی، پروفیل های عمقی و توزیع چگالی بود. نتایج با یکدیگر مقایسه شد و پیشنهادهایی برای پایش میدانی و مدیریت تخلیه آب گرم ارائه گردید [۱۴-۱۵].

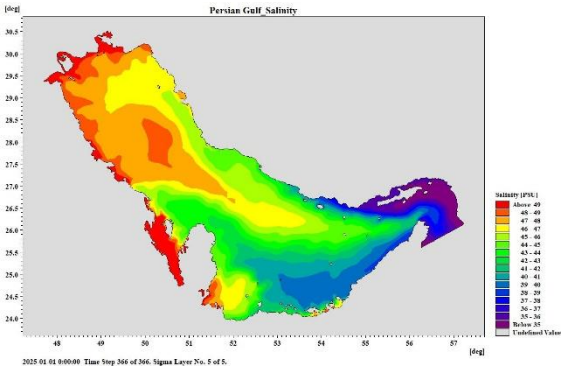
۳. یافته‌ها

الف. نتایج

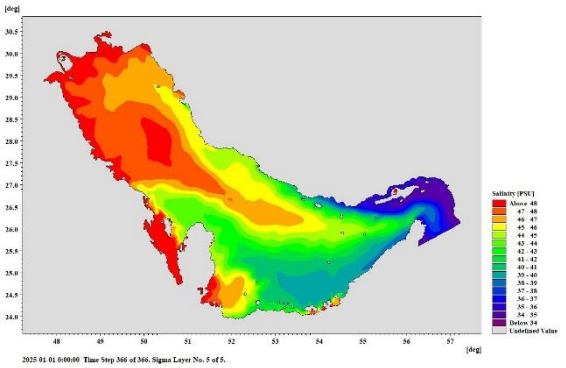
خروجی‌های ارائه‌شده (شکل ۳ و ۲) بیانگر الگوی توزیع شوری در خلیج فارس برای دو سناریو هستند: در سناریوی اول شرایط پایه (بدون تخلیه) در نظر گرفته شده است (شکل ۳ و ۲ .الف) و در سناریوی دوم (مداخله‌ای) جریان خروجی آب گرم از واحد صنعتی با دبی $Q = 100\ \mathrm{m^3/s}$ به خلیج فارس وارد شده است(شکل ۳ و ۲.ب). هر دو نقشه مربوط به یک زمان مشخص و یک لایه عمقی یکسان (لایه پنجم سیگما) هستند، بنابراین اختلاف میان آن‌ها ناشی از اثرات هیدرودینامیکی و تغییر خصوصیات آب ناشی از تخلیه است.

مقایسه نقشه‌ها نشان می‌دهد که در حضور تخلیه ، شوری در سواحل استان بوشهر و سواحل شرقی خلیج‌فارس افزایش یافته است (شکل ۴ و ۵)؛ به‌گونه‌ای که مناطقی که در حالت پایه دارای شوری حدود ۴۴ تا ۴۶ PSU بودند(شکل ۴ و ۵.الف)، در سناریوی مداخله‌ای به محدوده ۴۶ تا ۴۷/۵ PSU و حتی بالاتر رسیده‌اند(شکل ۴ و ۵.ب).

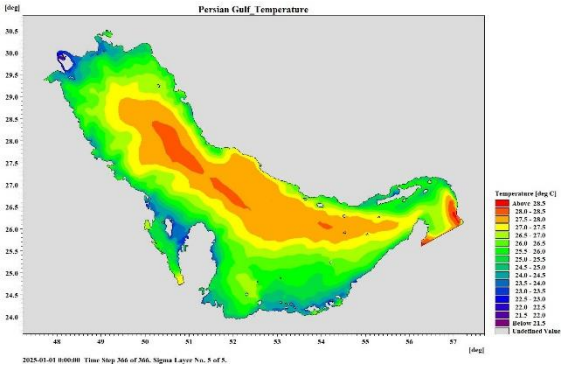
در نواحی شمال‌غربی خلیج فارس، به‌ویژه پیرامون دهانه شط‌العرب و سواحل کویت که همواره شوری بالاتری دارند، محدوده با شوری بیش از ۴۸ PSU در حضور تخلیه گسترش یافته و به سمت جنوب و شرق توسعه پیدا کرده است. در بخش‌های ورودی آب اقیانوسی در نزدیکی تنگه هرمز که معمولاً شوری کمتر (حدود ۴۴ PSU) دارند نیز افزایش نسبی شوری مشاهده می شود که بیانگر گستره وسیع تأثیر تخلیه بر تراز شوری کل حوضه است. از دید هیدروفیزیکی، ورود آب گرم و معمولاً شورتر از تخلیه واحد صنعتی، با تغییر چگالی و تغییر لایه‌بندی طبیعی آب، الگوی جریان‌ها و اختلاط عمودی و افقی را تغییر می‌دهد. در نتیجه، جبهه‌های آب شور از محل تخلیه به سوی مناطق میانی و حتی ورودی خلیج گسترش می‌یابند و این امر می‌تواند بر چرخه‌های طبیعی آب، تبادل با تنگه هرمز و نهایتاً بر زیست‌بوم دریایی اثرگذار باشد.



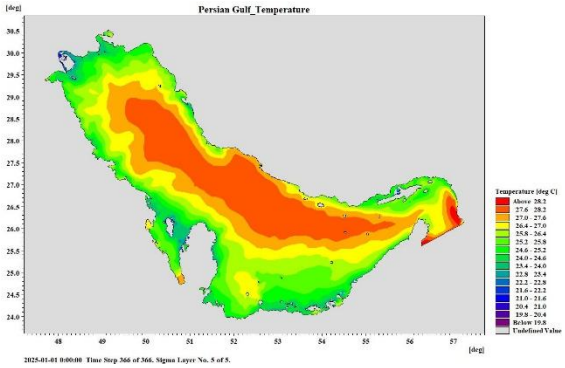
شکل ۲ الف. تغییرات شوری در خلیج فارس در سناریو اول (پایه) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



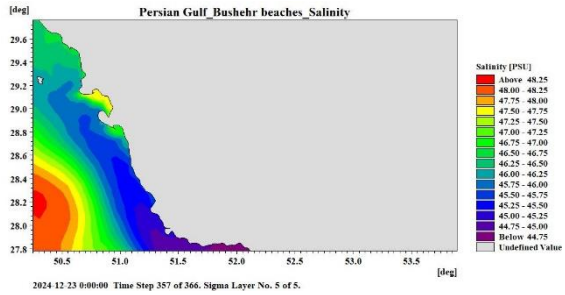
شکل ۲.ب. تغییرات شوری در خلیج فارس در سناریو دوم (مداخله‌ای) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



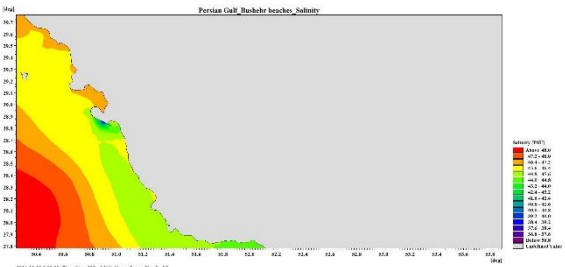
شکل ۳ الف. تغییرات دما در خلیج فارس در سناریو اول (پایه) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



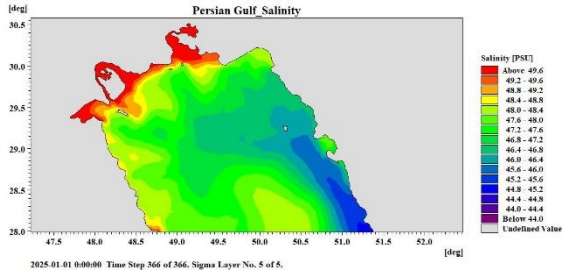
شکل ۳.ب. تغییرات دما در خلیج فارس در سناریو دوم (مداخله‌ای) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



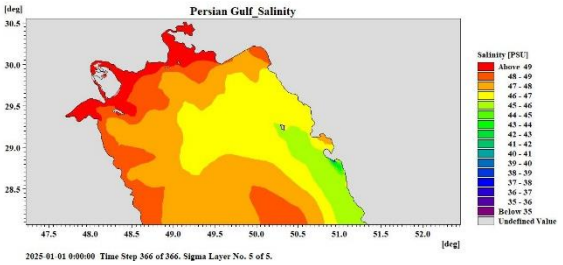
شکل ۴ الف. تغییرات شوری در محل تخلیه آبگرم در سواحل استان بوشهر در سناریو اول (پایه) در تاریخ ۲۰۲۴/۱۲/۲۳.



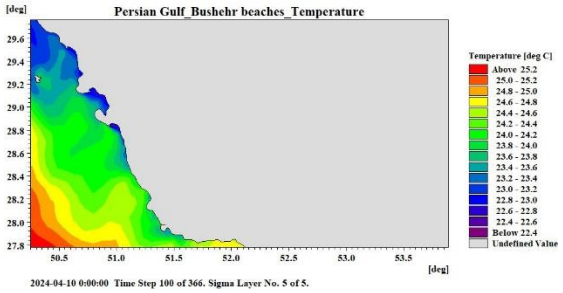
شکل ۴ ب. تغییرات شوری در محل تخلیه آبگرم در سواحل استان بوشهر در سناریو دوم (مداخله‌ای) در تاریخ ۲۰۲۴/۱۲/۲۳.



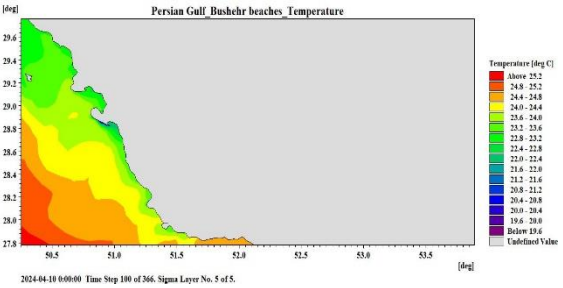
شکل ۵ الف. تغییرات شوری در محل تخلیه آبگرم در شمال خلیج فارس در سناریو اول (پایه) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



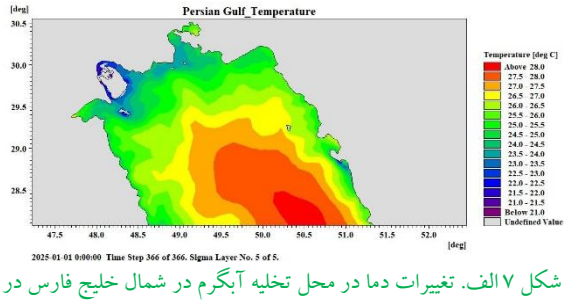
شکل ۵ ب. تغییرات شوری در محل تخلیه آبگرم در شمال خلیج فارس در سناریو دوم (مداخله‌ای) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



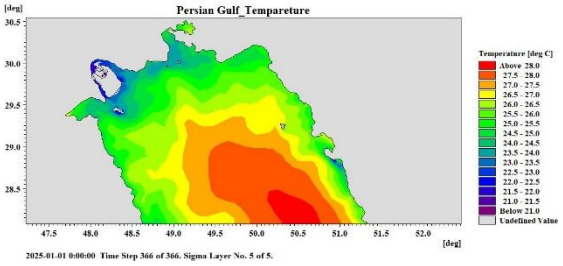
شکل ۶ الف. تغییرات دما در محل تخلیه آبگرم در سواحل استان بوشهر در سناریو اول (پایه) در تاریخ ۲۰۲۴/۰۴/۱۰.



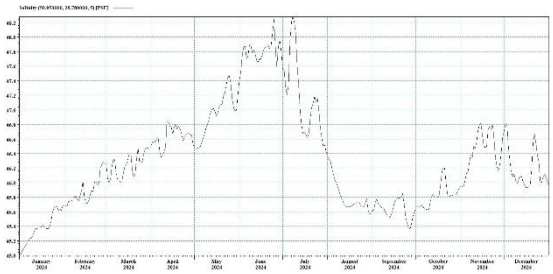
شکل ۶ ب. تغییرات دما در محل تخلیه آبگرم در سواحل استان بوشهر در سناریو دوم (مداخله‌ای) در تاریخ ۲۰۲۴/۰۴/۱۰.



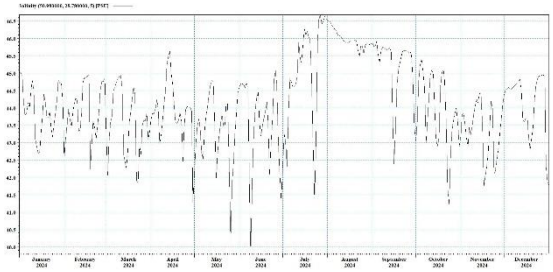
شکل ۷ الف. تغییرات دما در محل تخلیه آبگرم در شمال خلیج فارس در سناریو اول (پایه) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



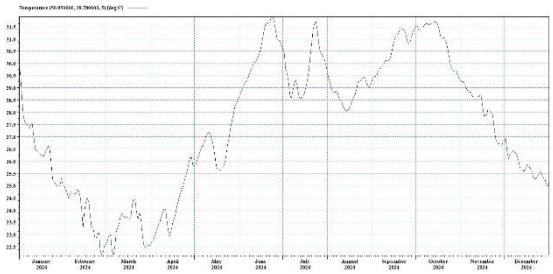
شکل ۷ ب. تغییرات دما در محل تخلیه آبگرم در شمال خلیج فارس در سناریو دوم (مداخله‌ای) در تاریخ ۲۰۲۵/۰۱/۰۱.



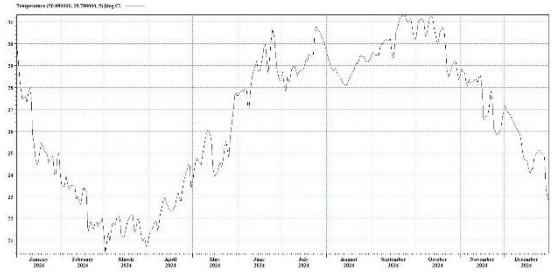
شکل ۸ الف. سری زمانی تغییرات ماهانه شوری برای سال ۲۰۲۴ در منطقه مورد مطالعه در سواحل استان بوشهر (سناریو اول پایه).



شکل ۸ ب. سری زمانی تغییرات ماهانه شوری برای سال ۲۰۲۴ در منطقه مورد مطالعه در سواحل استان بوشهر (سناریو دوم مداخله‌ای).



شکل ۹ الف. سری زمانی تغییرات ماهانه دما برای سال ۲۰۲۴ در منطقه مورد مطالعه در سواحل استان بوشهر (سناریو اول پایه).



شکل ۹ ب. سری زمانی تغییرات ماهانه دما برای سال ۲۰۲۴ در منطقه مورد مطالعه در سواحل استان بوشهر (سناریو دوم مداخله‌ای).

در خصوص دما، خروجی‌های ارائه‌شده (شکل ۶ و ۷) به‌صورت معمول ورود جریان‌های واحد صنعتی و آب گرم با دبی بالا منجر به افزایش دمای موضعی در ناحیه اطراف محل تخلیه می‌شود. آب گرم‌تر نسبت به آب محیط چگالی کمتری دارد و تمایل به ماندن در لایه‌های سطحی دارد. این پدیده می‌تواند موجب ایجاد لایه‌بندی حرارتی شدیدتر و کاهش اختلاط عمودی شود. کاهش اختلاط باعث می‌شود گرما و مواد محلول به لایه‌های زیرین کمتر انتقال یابد و دمای سطحی در محدوده وسیع‌تری افزایش پیدا کند. این افزایش دما همراه با افزایش شوری سبب تغییر گرادیان چگالی و در نتیجه تغییر مسیر و شدت جریان‌های ساحلی و جریانات چرخشی در سواحل بوشهر می‌شود (شکل ۶ و ۷ ب). از منظر بوم شناختی، بالا رفتن دما به‌ویژه در مناطق ساحلی و کم‌عمق می‌تواند استرس گرمایی بر موجودات حساس نظیر مرجان‌ها و گونه‌های کفزی وارد کند و اکسیژن محلول آب را کاهش دهد. همچنین گرمایش سطحی با افزایش تبخیر می‌تواند به صورت ثانویه به افزایش بیشتر شوری در نواحی مرکزی و جنوبی منجر شود و حلقه‌ای از بازخورد مثبت در تغییرات هیدروفیزیکی ایجاد کند.

تخلیه آب گرم از واحدهای صنعتی با دبی بالا، تأثیرات قابل توجهی بر شرایط هیدروفیزیکی و بوم‌شناختی خلیج فارس دارد. این فرآیند نه تنها موجب افزایش شوری در نواحی اطراف محل تخلیه می‌شود، بلکه از طریق تغییرات دما و گرادیان‌های چگالی، بر سامانه‌های گردش آب و تعادل هیدروفیزیکی در این منطقه تأثیر می‌گذارد. افزایش دما و تغییرات در چگالی آب، باعث اختلال در جریان‌های آبی و تغییر در الگوهای جزر و مدی می‌شود که در نهایت موجب تغییرات در فرآیندهای ته‌نشینی، توزیع مواد مغذی و اکوسیستم‌های دریایی می‌گردد. علاوه بر این، آب گرم و با شوری متفاوت، می‌تواند تغییراتی در شرایط زیستی منطقه ایجاد کند؛ به‌ویژه در نواحی نزدیک به منابع تخلیه، این تغییرات می‌تواند به کاهش تنوع زیستی، آسیب به صخره‌های مرجانی و تغییر در زنجیره‌های غذایی دریایی منجر شود. اثرات بلندمدت این تغییرات می‌تواند تعادل هیدروفیزیکی خلیج فارس را دگرگون کرده و باعث کاهش کارایی اکوسیستم‌ها و تهدید منابع زیستی در منطقه شود. در نتیجه، مدیریت دقیق و پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی تخلیه آب گرم به‌وسیله مدل‌سازی‌های هیدرودینامیکی و مطالعات جامع، برای حفظ تعادل طبیعی و اکولوژیکی خلیج فارس ضروری است.

در سناریوی اول (پایه)، مشاهده می شود که شوری نسبت به سناریوی اول تغییرات کمتری دارد (شکل۸.الف). در این حالت، شوری آب در خلیج فارس در طول سال به طور نسبی ثابت‌تر باقی می‌ماند و بیشتر در محدوده ۴۴ PSU تا ۴۵ PSU قرار دارد. این تغییرات کمتر نشان‌دهنده وضعیت طبیعی اکو سیستم ا ست که تحت تاثیر منابع غیر انسانی قرار ندارد و تغییرات شوری عمدتاً ناشی از تغییرات فصلی و طبیعت طبیعی محیط می‌باشد.

در سناریوی دوم (مداخله‌ای)، مشاهده می شود که شوری در طول سال نو سانات زیادی را تجربه می کند و این نو سانات به ویژه در فصل تابستان (ماه‌های ژوئن تا سپتامبر) به شدت افزایش می‌یابد (شکل۸.ب). در این دوره، شوری در برخی از نقاط به مقادیر بسیار بالای ۴۶ PSU نیز می‌ر سد. این تغییرات شدید در شوری، ناشی از ورود آب گرم به خلیج فارس است. ورود آب گرم، که معمولاً دارای شوری کمتری نسبت به آب دریا است، باعث ایجاد اختلالات در سیستم‌های هیدرودینامیکی منطقه می‌شود و تغییرات در غلظت نمک در آب را به دنبال دارد. در حقیقت، این فرآیند می‌تواند موجب افزایش نوسانات شوری در سطح آب و نیز کاهش کیفیت آب در سواحل استان بوشهر در خلیج فارس شود.

در سناریوی اول (پایه)، دمای آب در خلیج فارس نوسانات کمتری دارد و به طور طبیعی در طول سال تغییر می‌کند (شکل۹.الف). در این سناریو، دما معمولاً در محدوده ۲۴ درجه تا ۲۹ درجه سلسیوس باقی می‌ماند. این تغییرات دما نیز به‌طور فصلی ا ست و در مقایسه با سناریوی دوم، افزایش دما در فصل‌های گرم‌تر نسبتاً ملایم‌تر ا ست. در نتیجه، در شرایط بدون تخلیه، دما در محدوده‌ای ثابت‌تر قرار دارد که نشان‌دهنده شرایط طبیعی اکوسیستم است.

در سناریوی دوم (مداخله‌ای)، دمای آب در خلیج فارس به شدت تحت تأثیر ورود آب گرم از وا حد صنعتی قرار می‌گیرد (شکل۹ ب). این تاثیر به و ضوح در فصل‌های گرم سال (به ویژه در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر) قابل مشاهده ا ست، جایی که دما به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و به حدود ۳۰ درجه سلسیوس می‌رسد. این افزایش دما به دلیل وجود آب گرم ناشی از تخلیه است که در مقایسه با دمای طبیعی آب خلیج فارس بسیار بالاتر است. به طور کلی، دما در این سناریو روندی افزایشی دارد و در ماه‌های تابستان به اوج خود می‌رسد، که این تغییرات می‌تواند تاثیرات جدی بر اکوسیستم دریایی داشته باشد.

ب. مقایسه و تحلیل یافته‌ها

یافته‌ها نشان می‌دهد که ورود جریان خروجی واحد صنعتی به خلیج فارس تأثیر قابل توجهی بر شرایط هیدروفیزیکی منطقه ایجاد می کند، هرچند این اثرات عمدتاً در نواحی نزدیک به دهانه تخلیه متمرکز هستند. در سناریوی تخلیه (با دبی ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه) بیشینه افزایش دما نسبت به سناریوی پایه در لایه‌های فوقانی مشاهده شد و ΔT بیشترین مقدار خود را در نزدیکی دهانه نشان داده است، درحالیکه با افزایش فاصله از نقطه تخلیه، این اثر به تدریج کاهش یافته و در فواصل بیش از چند صد متر تقریباً به شرایط پایه نزدیک شده است. این نشان‌دهنده توانایی طبیعی جریان ها و اختلاط محیطی در کاهش شدت اثرات حرارتی است.

از سوی دیگر، تغییرات شوری ناشی از تخلیه آب گرم محدود و کمتر از تغییرات دما بود، زیرا شوری جریان خروجی تقریباً با آب محیط مطابقت داشت. پروفیل های عمقی دما و شوری نشان می‌دهد که زبانه حرارتی عمدتاً در لایه‌های سطحی گسترش می‌یابد و در لایه‌های عمقی تأثیر چندانی ندارد، با این حال در نزدیکی دهانه افزایش جزئی گرادیان چگالی مشاهده شده است که می‌تواند موجب لایه‌بندی کوتاه‌مدت در نواحی محدود شود(شکل۳و۲).

تحلیل سری‌های زمانی حاصل از ایستگاه‌های مجازی به دست آمده از پایگاه داده هایکام نشان می‌دهد که اثرات حرارتی در طول روز اول پس از تخلیه بیشترین شدت را دارند و سپس با اختلاط و جریان‌های محیطی کاهش می‌یابند. علاوه بر این، مساحت ناحیه سطحی تحت تأثیر $\Delta T>1^{\circ}C$ محدود به ناحیه نزدیک دهانه بوده و حجم آب تحت تأثیر نیز با افزایش فاصله از نقطه تخلیه به‌سرعت کاهش یافته است. بطورکلی، یافته ها حاکی از آن است که اثرات تخلیه در

شرایط بررسی شده، کوتاه‌مدت و محدود به نواحی اطراف دهانه است و با اعمال مدیریت مناسب بر دما و مکان تخلیه می‌توان اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش داد.

در مجموع، مقایسه این دو سناریو نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجهی است که ورود آب گرم از یک واحد صنعتی می‌تواند بر شرایط محیطی سواحل استان بوشهر بگذارد. در سناریوی با تخلیه آب گرم، هم شوری و هم دما در فصول مختلف سال تغییرات شدیدی را تجربه می‌کنند. این تغییرات به ویژه در فصل تابستان برجسته‌تر هستند، که می‌تواند ناشی از تأثیرات مستقیم تخلیه بر روی دمای آب و همچنین تغییرات در غلظت نمک در آب باشد. در این شرایط، شوری آب در برخی نقاط به حدی می‌رسد که می‌تواند به اکوسیستم منطقه آسیب بزند و باعث کاهش کیفیت آب شود. همچنین افزایش دما می‌تواند باعث تغییرات زیست‌محیطی، از جمله کاهش تنوع زیستی و تهدید به حیات آبزیان گردد.

در مقابل، در سناریوی پایه بدون تخلیه آب گرم، تغییرات دما و شوری به طور طبیعی در طول سال رخ می‌دهند و نوسانات کمتری دارند. این شرایط به‌طور کلی برای اکوسیستم دریایی خلیج فارس مطلوب‌تر است، زیرا هیچ عاملی به‌طور مصنوعی باعث تغییرات عمده در شرایط دما و شوری نمی‌شود و فرآیندهای طبیعی در منطقه حفظ می‌شود.

این یافته‌ها با نتایج تحقیقاتی همچون دکتر سیوف با همکاران[۱] هم‌راستا است که نشان می‌دهند تخلیه آب گرم تأثیرات جدی بر تغییرات دما و شوری داشته و این تغییرات می‌تواند منجر به اختلال در گردش طبیعی آب‌ها و شرایط زیست‌محیطی گردد.

در مقابل، سناریوی بدون تخلیه آب گرم که تغییرات دما و شوری به‌طور طبیعی در طول سال رخ می‌دهند، نوسانات کمتری دارند و به‌طور کلی شرایط زیست‌محیطی برای اکوسیستم‌های دریایی خلیج فارس مطلوب‌تر است. این شرایط مشابه با نتایج تحقیقدکتر جمشیدی و همکاران[۳] است که نشان می‌دهند تغییرات طبیعی دما و شوری تأثیرات کمتری بر اکوسیستم‌های دریایی می‌گذارند و فرآیندهای طبیعی همچنان حفظ می‌شوند. در نتیجه، بر اساس مقایسه این مطالعات و نتایج این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که تخلیه آب گرم از واحدهای صنعتی به‌ویژه در نواحی ساحلی خلیج فارس، تأثیرات قابل توجهی بر شرایط هیدروفیزیکی و اکولوژیکی منطقه خواهد داشت و می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در دما و شوری آب‌ها گردد که این تغییرات به‌ویژه در فصل تابستان برجسته‌تر هستند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در بررسی دو سناریوی شبیه سازی شده، نتایج نشان داد که ورود جریان خروجی واحد صنعتی با دبی ۱۰۰ متر مکعب در ثانیه به خلیج فارس تأثیر ملموسی بر شرایط هیدروفیزیکی منطقه دارد. در سناریوی مداخله‌ای، افزایش دمای محلی نسبت به سناریوی پایه به وضوح در نزدیکی دهانه تخلیه مشاهده شد و بیشینه ΔT عمدتاً در لایه‌های فوقانی آب تجمع یافته است. این افزایش دما باعث ایجاد زبانه حرارتی سطحی شد که با فاصله گرفتن از دهانه، به تدریج با آب محیط اختلاط یافته و تأثیر آن کاهش یافت. تغییرات شوری در سناریوی تخلیه آب گرم کمتر از تغییرات دما بود، زیرا شوری جریان خروجی تقریباً با آب محیط همخوانی داشت، اما در لایه‌های نزدیک دهانه و هنگام اختلاط اولیه، تغییرات محدودی مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر کوتاه‌مدت بر ساختار چگالی آب است.

تحلیل پروفیل‌های عمقی نشان داد که ورود آب گرم باعث افزایش گرادیان دما و چگالی در لایه‌های فوقانی شده و می‌تواند لایه‌بندی جزئی ایجاد کند، در حالی که لایه‌های عمقی تأثیر چندانی از تخلیه آب گرم نگرفتند. مقایسه بین دو سناریو همچنین نشان داد که اثرات حرارتی به سرعت در میدان دور کاهش یافته و در فاصله‌های بیش از چند صد متر از دهانه تقریباً به شرایط پایه نزدیک می‌شود، که بیانگر ظرفیت اختلاط طبیعی و جریان‌های محیطی در کاهش اثرات تخلیه آب گرم است.

نتایج حاکی از آن است که در شرایط بررسی‌شده، اثرات کوتاه‌مدت تخلیه آب گرم بر دما و شوری محدود به نواحی

نزدیک دهانه اســت و با اعمال مدیریت مناســب، از جمله کنترل دمای خروجی و مکان یابی صــحیح دهانه، می‌توان اثرات منفی زیســت‌محیطی را به حداقل رســاند. در مجموع، این مطالعه نشان داد که شبیه‌سازی‌های عددی با دو سناریوی ساده می‌تواند به درک کلی از محدوده تأثیر و شدت تغییرات هیدروفیزیکی ناشــی از تخلیه آب گرم کمک کرده و پایه‌ای برای تصــمیم‌گیری در مدیریت منابع آبی و حفاظت از اکوسیستم‌های حساس خلیج فارس فراهم کند.

این یافته‌ها پایه‌ای برای تصمیم‌گیری مدیریتی در زمینه کنترل دمای خروجی، تعیین مکان مناسب دهانه و طراحی برنامه‌های پایش محیطی فراهم می‌کننــد و نشــان می‌دهــد کــه شبیه سازی‌های عددی می‌توانند ابزار موثری برای پیش‌بینی و ارزیابی اثرات تخلیه آب گرم واحد صــنعتی در خلیج فارس باشند.

در نهایــت، این پژوهش می‌توانــد مبنــای علمی و فنی برای سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و طراحی واحدهای صنعتی ساحلی در خلیج فارس و سایر مناطق مشابه باشد. اعمال تدابیر مناســب در مدیریت تخلیه حرارتی می‌تواند به حفظ تنوع زیســتی و ســلامت اکوســیســتم‌های دریایی کمک کند و از پیامدهای منفی ناشی از تغییرات حرارتی بر این اکوسیستم‌ها جلوگیری کند.

سپاسگزاری

از پژوهشگرانی که در زمینه اکتساب داده‌های مورد نیاز برای انجام این پژوهش همکاری نمودند قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] Ramak Hossein, Soyuf Jahromi Maryam, Akbari Parasto. Investigation of salinity and temperature of Persian Gulf water by FVCOM Model. 2023;13:106-120.

[2] Azarnivand AR, Sadrinasab M, Nasseri M. Climate Change Impacts on the Seasonal Variation of Hydro-Physical Characteristics in the Persian Gulf. Estuaries and Coasts. 2023;46: 302–322.

[3] Jamshidi S, Abu Bakar NB. Seasonal variations in temperature, salinity and density in the southern coastal waters of the Caspian Sea. Oceanology.2012;52:380–396.

[4] Mahpeykar Omid, Khalilabadi Mohammadreza, Kenarkoohi Karim. The study of the effect of Arvandroud on Persian Gulf Salinity change using MIKE model. JOURNAL OF MARINE SCIENCES AND TECHNOLOGY.2021: 20(3): 50–65.

[5] Andersson B, Andersson R, Håkansson L, Mortensen M, Sudiyo R, Van Wachem B. Computational fluid dynamics for engineers. Cambridge university press;2012.

[6] Khalilabadi M , Daneshmehr S, Akbarnezhad baie M. Modeling of water fronts in the Makran coast. Hydrophysics. 2024;9(2):27-39.

[7] Sharbaty S, Hosseini SS, Hosseini SA, Nasimi S. Numerical simulation of temperature, salinity and density in the Caspian Sea using MIKE 3. J. Biol. Today's World. 2012;1:51-62.

[8] Mahpeykar O , Khalilabadi MR. Numerical modelling the effect of wind on Water Level and Evaporation Rate in the Persian Gulf. International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering(ijcoe). 2021;6(1): 47-53.

[9] Pilati DA. Cold shock: biological implications and a method for approximating transient environmental temperatures in the near-field region of a thermal discharge. Science of the Total Environment.1976;6(3):227-237.

[10] DHI Water & Environment, MIKE 3 Flow Model FM: Flexible Mesh 3D Hydrodynamic Module User Manual. Hørsholm, Denmark: DHI; 2020.

[11] Suh SW. A hybrid near-field/far-field thermal discharge model for coastal areas. Marine pollution bulletin. 2001 Jul 1;43(7-12):225-33.

[12] Chen Z, Wang Z, Zeng Z, Liu J. Variations in Temperature and Salinity at Different Survey Periods in the Central and Eastern Beibu Gulf and Their Relationship with Circulation Patterns. Water. 2025 Sep 14;17(18):2719.

[13] Mogaddam SF, Bidokhti AA, Givi FA, Ezam M. Evaluation of physical changes (temperature and salinity) in the Persian Gulf waters due to climate change using field data and numerical modeling. International Journal of Environmental Science and Technology. 2020 Apr;17(4):2141-52.

[14] Antonov JI, Levitus S, Boyer TP. Steric sea level variations during 1957–1994: Importance of salinity. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2002 Dec;107(C12):SRF-14.

[15] Khalilabadi MR, Daneshmehr S, Akbarnezhad Baie M. THE EFFECTS OF MONSOON ON THE IRANIAN COASTS IN THE GULF OF OMAN. International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering

(ijcoe). 2024 May 15;9(2):19-25.doi: 10.22034/ijcoe.2025.470644.1090

پی‌نوشت‌ها

1. Discharge
2. Stratification
3. Thermal Plume
4. RANS
5. advection–diffusion
6. Flexible Mesh