

## تغییرات زمانی و مکانی انتشار فسفات منتشر شده از قفس‌های پرورش ماهی رویان واقع در جنوب دریای خزر

حدیقه مفارقی<sup>۱</sup>، اکبر رشیدی ابراهیم حصاری<sup>۲\*</sup>

۱- گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲- گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

### چکیده

در این پژوهش، انتشار فسفات رها شده از قفس‌های مزارع پرورش ماهی واقع در منطقه‌ی دریایی رویان واقع در بخش جنوبی دریای خزر با استفاده از یک مدل عددی هیدرودینامیکی سه بعدی مجهز به انتشار آلاینده‌های محلول در آب دریا، مورد مطالعه قرار گرفت. برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی، نقشه هیدروگرافی، با دقت ۱۵ ثانیه‌ی جغرافیایی، سری زمانی باد با فواصل زمانی ۶ ساعته، میدان دما، شوری و چگالی میانگین ماهانه به مدل اعمال گردید. جهت بررسی انتشار فسفات منتشر شده از قفس‌های مزرعه‌ی پرورش ماهی رویان، جریان‌ات ناشی از باد در کل حوضه‌ی دریای خزر با تفکیک فضایی ۰/۱ درجه و سپس در مدل ریز مقیاس، از محدوده‌ی دریایی نور تا نوشهر با تفکیک ۰/۰۴۵ درجه‌ی جغرافیایی شبیه‌سازی شده، الگوی انتشار فسفات از قفس‌های مزبور، در چهار دوره‌ی پرورش ماهی متوالی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. چشمه‌ی آلاینده‌ی فسفات در محل استقرار قفس‌ها و به صورت نشت مداوم ۸ ماهه و سپس توقف ۴ ماهه تا شروع دوره‌ی بعدی به مدل اعمال گردید.

### نوع مقاله

#### مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ چاپ الکترونیکی:

۱۴۰۵/۰۳/۲۵

\*نویسنده مسئول:

akbar.rashidi@modares.ac.ir

**کلید واژه‌ها:** دریای خزر، شبیه‌سازی عددی، مزارع پرورش ماهی رویان، انتشار فسفات

### مقدمه

آبزی‌پروری دریایی شامل پرورش انواع آبزیان از جمله ماهیان پرورشی در اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای حفظ ذخایر طبیعی و روش‌های سنتی باشد (Gimpel et al., 2015). این صنعت دریایی به سرعت در حال توسعه است و سریع‌ترین رشد را در زمینه‌ی تولید مواد غذایی دارد (Abreu et al., 2009). امروزه تقریباً نیمی از غذای دریایی جهان از آبزی‌پروری تأمین می‌شود (FAO, 2012). وسعت دریای خزر و قرار گرفتن آن بین آب و هوای گرم و بیابانی، خشک، جلگه‌ای، سرد و مرطوب منشاء ویژگی‌های قابل ملاحظه‌ای است، و پرورش ماهی در قفس در سال‌های اخیر مورد توجه سرمایه‌گذاران قرار گرفته و فعالیت آبزی‌پروری در جنوب دریای خزر توسعه یافته است. دریای خزر با حجمی در حدود ۷۸۲۰۰ کیلومتر مکعب بزرگترین حجم آبی محصور شده جهان است که ۴۴٪ از کل آب دریاچه‌های جهان را در بر دارد (Mofidi et al., 2018). با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی، جغرافیایی و توپوگرافی بستر، می‌توان دریای خزر را به سه حوضه شمالی، میانی و جنوبی تقسیم کرد. حجم آب موجود در حوضه شمالی در حدود ۱٪ و حوضه میانی ۳۲٪ و حوضه جنوبی در حدود ۶۷٪ حجم کل آب دریای خزر است (Kosarev et al., 2004). عدم وجود دماغه، خور و خلیج، سبب شده است که استقرار قفس‌های پرورش ماهی در فضای آزاد دریا و دور از ساحل قرار داده شوند (Refa, 2002). پرورش ماهی در قفس در دریا با توجه به ساحل ۳۸۸ کیلومتری

دریای خزر در حوزه استحفاظی مازندران یکی از ظرفیت‌های مهم در تولید انواع گونه‌های ماهی مانند قزل‌آلا، سفید، خاویار و ... به شمار می‌رود. دریای خزر به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آبی ایران و شرایط مناسب آب و هوایی، مستعد آبی‌پروری دریایی بوده و در بخش جنوبی دریای خزر تاکنون مزارع متعددی در آب‌های کم عمق مناطق دریایی بابلسر، رویان، سیسنگان، چالوس، تنکابن و رامسر احداث شده اند. اجرای طرح پرورش ماهی در قفس در مازندران از سال ۱۳۸۹ آغاز شد و در سال ۱۳۹۲ شتاب گرفت. دریای خزر طبق تحقیقات کارشناسان خارجی و شیلات کشور، ظرفیت تولید مقدار ۳۷۰۰۰ تن ماهی به شیوه استقرار قفس‌های دریایی را دارد که سهم مازندران از این میزان ۲۰۰۰۰ تن ارزیابی شده است.

اگر چه آبی‌پروری دریایی به عنوان یکی از شیوه‌های نوین این پتانسیل را دارد که نقش مهمی در برآورد تقاضای جهانی غذاهای دریایی در آینده داشته باشد (Duarte et al., 2009) اما همچنین اثرات منفی در محیط زیست اطراف خود، در قالب انتشار آلاینده‌های شیمیایی به دنبال دارد و باعث کاهش کیفیت اکوسیستم‌های آبی می‌شود (Dapueto et al., 2015). آزادسازی پسماندهای آلی ممکن است تغییراتی را در ساختار جامعه و تنوع زیستی گونه‌های کفزی دریاها ایجاد کند (Tsutsumi et al., 1991; Yokoyama, 2013). بنابراین افزایش آگاهی علمی در مورد پراکندگی آلاینده‌های منتشر شده از تأسیسات آبی‌پروری و تأثیرات بعدی آنها بر اکوسیستم‌های دریایی، همچنین انتخاب مکان و روش‌های مدیریتی مناسب و یکپارچه منطقه ساحلی می‌تواند به آبی‌پروری پایدار منجر شود (Ervik et al., 2008). انتشار ضایعات خوراک، مدفوع و سایر محصولات جانبی متابولیک، مهمترین منبع تأثیرگذار در اعماق آب‌های ساحلی محسوب شده و از آن به عنوان یک شاخص مناسب در تشخیص سایت‌ها و ارزیابی وضعیت محیطی استفاده می‌گردد (Carvajalino-Fernandez et al., 2020). بنابراین ایجاد، نگهداری و توسعه مکان‌های مناسب و پایدار آبی‌پروری کار دشواری بوده و مستلزم آگاهی کافی در رابطه با محیط زیست و هیدرودینامیک هر منطقه‌ی دریایی قلمداد می‌گردد. مکان‌یابی نامناسب و احداث مزارع پرورش ماهی در مکان‌هایی با شرایط نامناسب محیطی، باعث شکست پروژه‌های آبی‌پروری می‌شود و آسیب‌های جبران ناپذیری به اکوسیستم‌های دریایی وارد می‌کند (Boyd and Clay, 1998; Naylor et al., 2000).

از آنجا که قفس ماهی بیشتر از شبکه‌های توری ساخته شده است، آب از طریق قفس ماهی با جریان آب منتقل می‌شود، که در نتیجه منجر به آزادسازی مستقیم ذرات و مواد مغذی حل شده در محیط آبی می‌شود (Troell et al., 2009). زباله‌های آلی ذرات، با قرار گرفتن در کف دریا و تولید رسوبات غنی شده، باعث دفع اکسیژن رسانی به آب زیرین می‌شود، و تولید ترکیبات کاهش یافته مانند آمونیوم و همچنین سولفیدها، و تغییر در ساختار جامعه بنتیکی می‌شود (Zhang et al., 2015). بنابراین ابزارهایی برای ارزیابی خطرات زیست محیطی ناشی از آبی‌پروری دریایی برای پیشروی به سمت توسعه پایدار محیط زیست، مورد نیاز است تا بتوان توسط آن ابزارها، سیاست‌ها و روش‌های علمی را برای محافظت از اکوسیستم‌های دریایی در دستور کار قرار داد (Price et al., 2015). در این زمینه، از مدل‌های عددی به عنوان یکی از قوی‌ترین، مقرون به صرفه‌ترین و کارآمدترین ابزارها برای مدل‌سازی ورودی، توزیع و تخلیه پسماندها به منظور پیش‌بینی و پشتیبانی تصمیم‌سازی‌های لازمه یاد می‌شود (Hassebe et al., 2012). فناوری مدل‌سازی، یک ابزار مناسب برای فهم، ارزیابی، پیش‌بینی و مدیریت اثرات آبی‌پروری محسوب می‌گردد که فرضیات بسیاری در زمینه‌ی هیدروگرافی مناطق مورد مطالعه را ساده‌سازی می‌کند و همچنین اثرات احتمالی پرورش ماهی در قفس را برآورد می‌کند. از قابلیت‌های مدل‌های هیدرودینامیکی به عنوان یک ابزار مدیریتی قابل اطمینان، می‌توان به مکان‌یابی بهینه برای استقرار قفس‌های پرورش ماهی، پیش‌بینی دقیق‌تر از چگونگی پراکندگی پسماندهای آلی در مناطق نزدیک و دور از قفس‌ها، انتخاب مناسب شکل، نوع و اندازه‌ی قفس‌ها، تجزیه و تحلیل مواد مغذی و آلاینده‌ها، پایداری محیط زیست و شناخت بهتر نسبت به انتشار آلاینده‌ها از مزارع پرورش ماهی اشاره کرد (Alfatih et al., 2011; Bannister et al., 2016).

علی رغم پیشرفت‌های حاصله در علوم و فنون دریایی، هنوز دستیابی به محیط زیست پایدار در صنعت آبی‌پروری در اکوسیستم‌های ساحلی به دلیل کمبود اطلاعات از نحوه تعامل منطقه‌ای و سرنوشت پساب‌های آلی در اکوسیستم‌های اعماق دریا، با محدودیت‌هایی مواجه هست. اولین قدم برای پرداختن به این محدودیت، ایجاد ابزارهای مدل‌سازی پیش‌بینی برای درک بهتر پراکندگی محلی و منطقه‌ای پساب آلی در اکوسیستم گسترده‌تر است (Bannister et al., 2016) و یافتن پاسخ این سوال مهم و اساسی که؛ بالاترین تراکم پسماندهای آلی در چه مناطقی است؟ در این زمینه، از مدل‌های عددی به عنوان یکی از قوی‌ترین، مقرون به صرفه‌ترین و کارآمدترین ابزارها برای مدل‌سازی ورودی، توزیع و تخلیه‌ی پسماندها به منظور پیش‌بینی و پشتیبانی تصمیم‌سازی‌های لازمه یاد می‌شود. فناوری مدل‌سازی آبی‌پروری، یک ابزار مناسب برای فهم، ارزیابی، پیش‌بینی و مدیریت اثرات آبی‌پروری محسوب می‌گردد (Hasseeb et al., 2012). برای مطالعه و بررسی ضایعات منتشر شده از قفس‌های پرورش ماهی یک مدل هیدرودینامیکی به همراه مدل‌های ردیابی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از قابلیت‌های مدل‌های هیدرودینامیکی به عنوان یک ابزار مدیریتی قابل اطمینان، می‌توان به مکان‌یابی بهینه برای استقرار قفس‌های پرورش ماهی، پیش‌بینی دقیق‌تر از چگونگی پراکندگی پسماندهای آلی در مناطق نزدیک و دور از قفس‌ها، انتخاب مناسب شکل، نوع و اندازه‌ی قفس‌ها، تجزیه و تحلیل مواد مغذی و آلاینده‌ها، پایداری محیط زیست و شناخت بهتر نسبت به انتشار آلاینده‌ها از مزارع پرورش ماهی اشاره کرد (Bannister et al., 2016). مدل‌سازی پراکندگی و رسوب پسماند، یکی از کم هزینه‌ترین ابزار برای برآورد تأثیر زیست محیطی صنعت پرورش ماهی در نظر گرفته می‌شود (Alfatih, 2011). برای پیش‌روی به سمت توسعه‌ی پایدار محیط زیست، ابزارهایی برای ارزیابی خطرات زیست محیطی ناشی از آبی‌پروری دریایی مورد نیاز است تا بتوان توسط آن ابزارها، سیاست‌ها و روش‌های علمی را برای محافظت از اکوسیستم‌های دریایی در دستور کار قرار داد (Price et al., 2015). از این دست مطالعات می‌توان پژوهش Panchang و همکاران (1997)؛ Cromey و همکاران (2002)؛ Doglioli و همکاران (2004)؛ Vita و همکاران (2004)؛ Huiwen و همکاران (2007) اشاره کرد. همچنین در این راستا، برخی پژوهشگران از مدل‌های هیدرودینامیکی آماده استفاده نموده و برخی دیگر متناسب با ویژگی‌های هیدرودینامیکی منطقه مورد مطالعه مدل‌های هیدرودینامیکی مورد نیاز را طراحی کرده اند. از این دست مطالعات می‌توان پژوهش‌های Alfatih و همکاران (2011)، Chang و همکاران (2014)، Subhas و همکاران (2011)، Rashidi Ebrahim Hesari و همکاران (2018)، همچنین Zhao و همکاران (2020) را ذکر کرد.

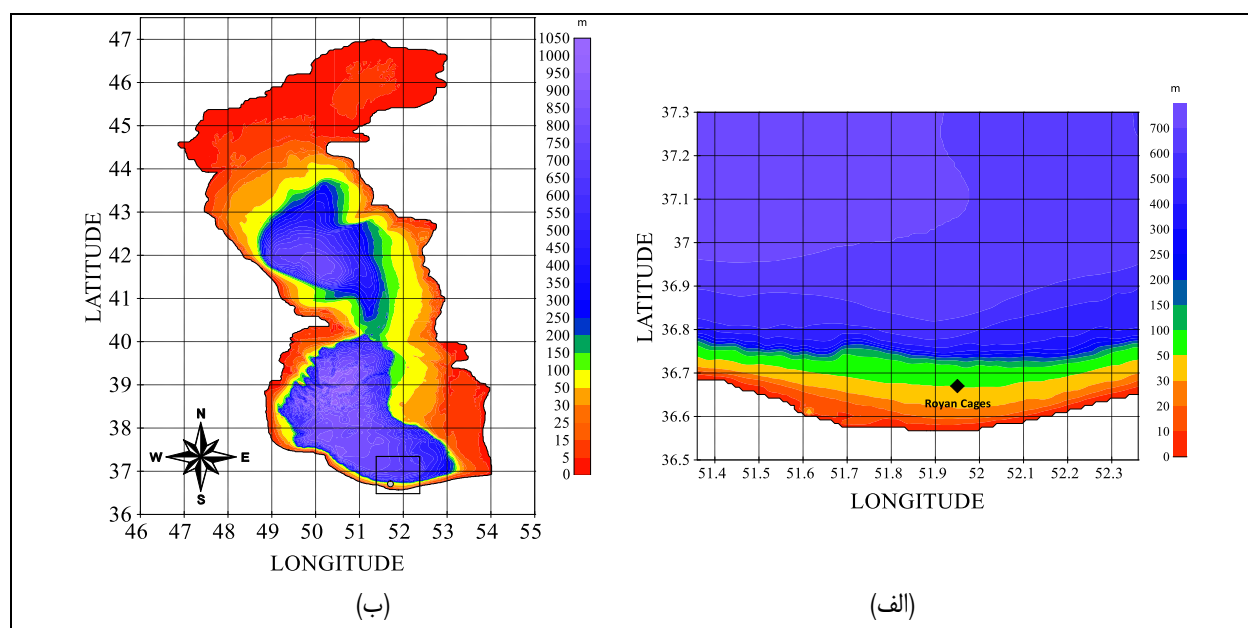
هدف اصلی در این پژوهش یافتن پاسخی برای این سوال است که تغییرات زمانی و مکانی انتشار آلاینده‌ها از قفس‌های پرورش ماهی در طول هر فصل پرورش، پایان هر دوره‌ی پرورش، توقف پرورش تا شروع فصل بعدی و سپس شروع دوره‌ی پرورش جدید ماهی (مطالعه موردی، مزرعه پرورش ماهی رویان واقع در بخش جنوبی دریای خزر) چگونه تغییر می‌کند؟ برای یافتن پاسخی برای این سوال، در این مطالعه، از یک مدل هیدرودینامیکی مجهز به مدول انتشار آلاینده‌های منتشر شده از مزارع پرورش ماهی (Rashidi Ebrahim Hesari et al., 2018) استفاده شده است. با توجه به شباهت شبیه‌سازی‌های عددی انتشار آلاینده‌ها در فرآیند مدل‌سازی عددی، به عنوان نمونه، انتشار فسفات از محل قفس‌ها مورد تمرکز قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

چنانچه اشاره گردید، در این مطالعه از یک مدل عددی هیدرودینامیکی مبتنی بر معادلات مقدم استفاده شده است. این مدل در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته و با تجهیز به مدول انتشار آلاینده‌های منتشر شده از قفس‌های پرورش ماهی در بخش جنوبی دریای خزر مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعه در رابطه با ویژگی‌های این مدل، جهت پرهیز از تکرار، به پژوهش‌های Rashidi Ebrahim Hesari و همکاران (2018) همچنین Bazregar و همکاران (2026) ارجاع داده می‌شود. محیط مورد مطالعه در این پژوهش، منطقه دریایی رویان، واقع در بخش جنوبی دریای خزر واقع در حد فاصل بین نور تا نوشهر می‌باشد (شکل ۱).

### مزرعه پرورش ماهی در منطقه‌ی مورد مطالعه

در سال‌های اخیر پرورش ماهی در قفس در دریای خزر گسترش یافته و از جمله در بخش جنوبی آن در مناطق مختلفی از جمله منطقه‌ی دریایی رویان و در فاصله‌ی حدوداً ۱۷ کیلومتری از مزرعه سیسنگان، در آب‌های کم‌عمق این منطقه فعالیت‌های آبی‌پروری دریایی در حال انجام است. قفس‌های این مزرعه از نوع قفس گرد از جنس پلی اتیلنی فشار قوی و تورهایی به عمق ۱۰ متر بوده، طول دوره‌ی پرورش از حدود آبان ماه لغایت خرداد ماه یعنی در حدود هشت ماه است. در منتهی‌الیه شمالی منطقه‌ی دریایی رویان کُنی شماره ۵ (بر اساس طبقه‌بندی اداره کل شیلات مازندران) در سال ۱۳۹۵ تعداد کل قفس‌های موجود در منطقه برابر ۲ قفس بوده است که هر دو قفس نیز فعال بوده‌اند و میزان برداشت از هر



شکل (۱) نقشه هیدروگرافی دریای خزر و موقعیت قرار گیری قفس‌های پرورش ماهی در منطقه‌ی دریایی رویان

**Figure 1. Bathymetry of the Caspian Sea and Royan fish farm location in the Southern Caspian Sea**

دو قفس برابر ۳۵ تن گزارش شده است. در سال ۹۶ تعداد کل قفس برابر ۲ عدد و قفس فعال موجود در منطقه یک عدد و میزان برداشت ۳۴ تن بوده است. طبق گزارش اداره کل شیلات در سال ۹۷ تعداد ۸ قفس با ظرفیت اسمی ۶۰۰ تن در منطقه موجود بوده که از این تعداد ۵ قفس فعال بوده‌اند. و میزان برداشت از این ۵ قفس ۱۳۷ تن ماهی بوده است. در سال ۹۸ تعداد ۸ قفس با ظرفیت اسمی ۱۰۰۰ تن موجود بوده است و تعداد قفس‌های فعال برابر ۴ قفس و میزان برداشت ۷۷ تن بوده است. در سال ۹۹ تعداد ۱۰ قفس در منطقه‌ی رویان با ظرفیت اسمی ۱۲۰۰ تن وجود داشته است که از این تعداد ۳ قفس فعال بوده و میزان برداشت از این قفس‌های فعال برابر ۵۲ تن ماهی بوده است. در سال ۱۴۰۰ به استناد داده‌های مالکین مزرعه‌های پرورش ماهی تعداد کل قفس‌ها برابر ۸ عدد بوده که از این تعداد ۵ قفس فعال بوده است. و با توجه به تخمین مالکین مزارع میزان برداشت از این قفس‌های فعال ۱۷۷ تن پیش‌بینی شده است. نوع غذای مصرفی ماهی‌ها و فرآیند تولید خوراک در مزارع پرورش ماهی از نوع اکستروود می‌باشد که تحت فشار و دمای زیاد خوراک آماده می‌شود تا قابلیت هضم غذا را افزایش یابد. در فرآیند غذادهی اگر خوراک به صورت مدفوع دفع شود نیتروژن به صورت آمونیاک وارد محیط دریایی می‌شود و اگر غذا به صورت مصرف نشده در آب دریا باقی بماند به صورت پروتئین در محیط باقی می‌ماند. اگر در تولید مواد غذایی از مواد گیاهی استفاده شود فسفات موجود در مواد غذایی به صورت فیتات است که هم در موقع دفع مدفوع و هم زمان حل شدن مواد غذایی مصرف نشده توسط ماهی‌ها در محیط دریایی باقی می‌ماند.

## اطلاعات و داده های استفاده شده در مطالعه

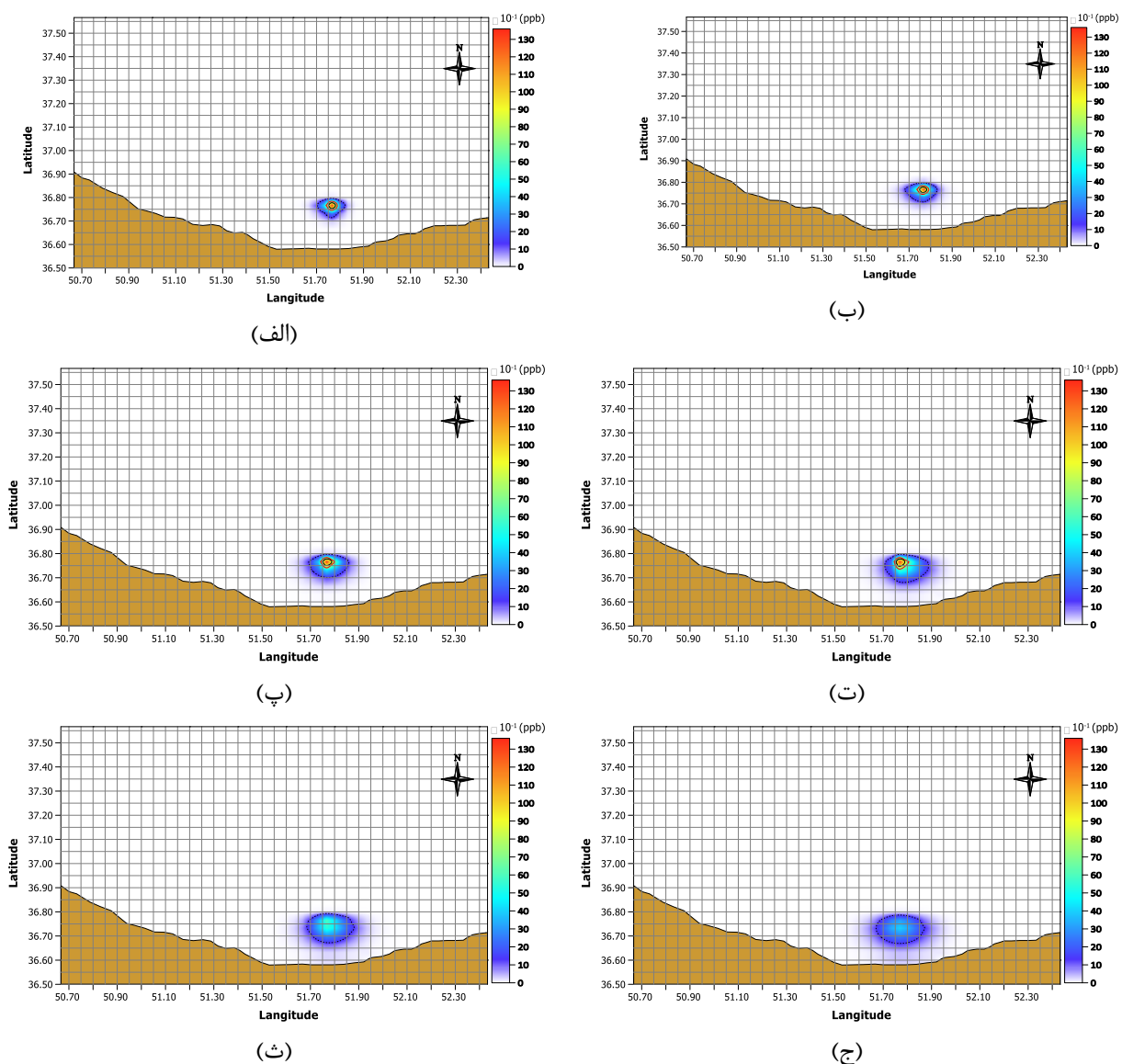
جهت انجام شبیه سازی های انجام شده توسط مدل، سری زمانی میدان باد ۱۰ متری سطح زمین از اطلاعات پروژه ERA5 بانک داده ای ECMWF با دقت ۰/۷۵ درجه جغرافیایی به شکل مؤلفه های شرقی و شمالی با فواصل زمانی ۳ ساعته استخراج و در طی عملیات بازتجزیه بر روی شبکه ی ریزتر با تفکیک ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی درون یابی شد. برای ارزیابی دقت اطلاعات مربوط به سرعت باد ده متری، از داده های باد ایستگاه سینوپتیک نوشهر در بازه ی مورد مطالعه استفاده گردید. در طی فرآیند شبیه سازی امواج ناشی از باد، به طور همزمان از مدول درون یابی مدل عددی SWAN برای درون یابی میدان باد استخراج شده از ERA5 بر روی شبکه محاسباتی نیز استفاده گردید. شبکه ی محاسباتی مدل نیز بر اساس داده های هیدروگرافی GEBCO با دقت ۱۵ ثانیه جغرافیایی استخراج و به مدل وارد گردید. وضعیت محیطی دریا نیز بر اساس داده های میانگین ماهیانه دما، شوری و چگالی از پایگاه داده ای WOA به مدل اعمال شد. از آنجایی که برای شبیه سازی جریانات ناشی از باد در منطقه ی مورد مطالعه (نور تا نوشهر) لازم است تا اطلاعات مربوط به مرزهای باز (شمالی، شرقی و غربی) به مدل اعمال شوند، ابتدا مدل برای شبیه سازی جریانات ناشی از باد در کل حوضه ی دریای خزر با تفکیک فضایی ۰/۱ درجه اجرا و سری زمانی اطلاعات لازم برای استفاده در مرزهای باز در مدل ریز مقیاس، از محدوده ی دریایی نور تا نوشهر با تفکیک ۰/۰۰۴۵ درجه ی جغرافیایی درون یابی و ذخیره شدند.

## نتایج

با توجه به اندازه گیری های میدانی انجام شده و همچنین آنالیز شیمیایی نمونه های آب برداشت شده در منطقه ای در نزدیکی قفس های پرورش ماهی در رویان، مقدار غلظت اولیه ی فسفات در منبع یا چشمه ی آلودگی در منطقه ی رویان ۱۳ ppb در نظر گرفته شده است. برای تفسیر بهتر نتایج انتشار فسفات با غلظت های کمتر در فاصله های گوناگون از روی شکل های رسم شده به دلیل غلظت کم فسفات که در محیط های دریایی از مرتبه ی ۱ ppb می باشد مقدار ۱ ppb به عنوان کمترین مقدار غلظت برای فسفات منتشر شده در نظر گرفته شده است. بعلاوه مقدار غلظت به میزان ۱۰، ۵۰ و ۷۰ درصد منبع یا چشمه ی آلودگی برای بررسی انتشار با این غلظت در فاصله های گوناگون بررسی شده است. در این قسمت ابتدا به تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی عددی انتشار فسفات از قفس های پرورش ماهی در طول ۸ ماه دوره ی پرورش و در انتهای هر دو ماه، از ابتدای سال ۲۰۱۶ میلادی تا پایان دوره ی پرورش یعنی آخر ماه هشتم (انتهای ماه آگوست) پرداخته شد. سپس برای ۴ ماه توقف دوره ی پرورش یعنی انتهای ماه دهم و دوازدهم برای سال ۲۰۱۶ شبیه سازی انجام و در ادامه با تداوم این بازه های زمانی تا ماه دسامبر ۲۰۲۰ شبیه سازی ها ادامه یافته و الگوهای انتشار فسفات مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۲). برای مشاهده و تفسیر بهتر مقادیر خروجی پیش بینی غلظت فسفات در <sup>-۱</sup> ۱۰ ضرب شده است.

## میزان انتشار فسفات در دوره اول پرورش (سال ۲۰۱۶)

نتایج شبیه سازی انتشار فسفات در پایان دوره ی اول پرورش ماهی و در پایان ماه هشتم در منطقه ی رویان نشان داد که انتشار فسفات در راستای جنوب و شرقی به طور پیوسته گسترش پیدا کرده است. غلظت فسفات در راستای شمالی تا فاصله ی کمتر از ۵۰۰ متری از قفس ها، ۷۰ درصد غلظت اولیه ی منبع؛ تا فاصله ی ۱/۳ کیلومتری ۵۰ درصد غلظت اولیه و تا فاصله ی ۳/۵ کیلومتری ۱۰ درصد غلظت اولیه ی منبع رسیده است. در بخش شرقی قفس ها میزان فسفات با غلظتی معادل با ۷۰ درصد آن در منبع در فاصله ی کمتر از یک کیلومتر مشاهده گردید؛ در حالی که غلظت آلاینده در فاصله ی ۲/۲ کیلومتری و در فاصله ی ۹/۶ کیلومتری به ترتیب به ۵۰ و ۱۰ درصد میزان آن در منبع می رسد. در قسمت غربی قفس ها غلظت فسفات در فواصل حدوداً ۰/۵، ۱/۳ و ۴/۳ کیلومتری از محل استقرار قفس ها به ترتیب به مقدار ۷۰، ۵۰ و ۱۰ درصد مقدار آن در منبع انتشار می رسد. انتشار فسفات در بخش جنوبی قفس ها قوی تر از راستاهای دیگر صورت می گیرد، به این ترتیب که در راستای جنوب قفس ها تا فاصله ی کمتر از ۱، ۲/۵ و ۸/۵ کیلومتری از قفس ها، غلظت فسفات به ترتیب تا ۹/۱ ppb، ۶/۵ ppb و ۱/۳ ppb انتشار پیدا می کند.



شکل (۲) میزان انتشار فسفات در لایه سطحی پس از دو ماه (الف)، چهار ماه (ب)، شش ماه (پ)، هشت ماه (ت)، ده ماه (ث) و دوازده ماه (ج) در سال ۲۰۱۶ در منطقه رویان

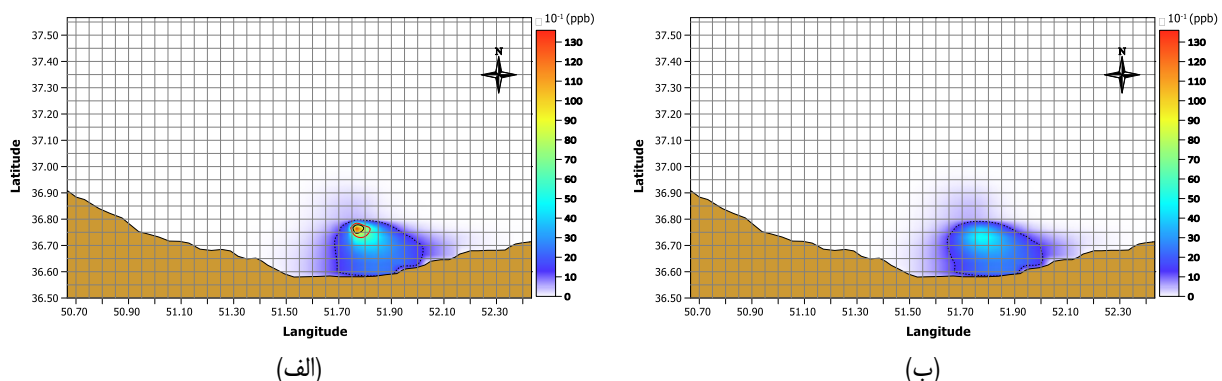
**Figure 2. Phosphate diffusion in surface layer at the end of February, April., June., August., and December 2016 in the Royan marine basin**

نتایج شبیه‌سازی انتشار فسفات در انتهای ماه دوازدهم یعنی چهار ماه پس از پایان دوره‌ی اول پرورش نشان می‌دهد که انتشار فسفات در راستای غرب و جنوب قفس‌ها تا حدودی گسترش بیشتری داشته است. در راستای جنوبی فسفات با غلظتی معادل ۱۰ درصد غلظت در منبع یعنی ppb ۱/۳ در فاصله‌ی ۱۰/۴ کیلومتری، در راستای شمالی در فاصله‌ی ۲/۵ کیلومتری، در راستای شرقی در فاصله‌ی ۷/۹ کیلومتری و در راستای غربی در فاصله‌ی ۷/۴ کیلومتری با ۱۰ درصد غلظت در منبع انتشار پیدا کرده است.

## میزان انتشار فسفات در دوره دوم تا پنجم پرورش ماهی (سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰)

چنانچه ذکر گردید؛ میزان انتشار در پایان فصل اول پرورش ماهی، خطوط هم مقدار فسفات برابر با ۷۰ درصد مقدار آن در منبع انتشار، در راستاهای شمالی، جنوبی، شرقی و غربی به ترتیب تا ۳/۳، ۹/۵، ۱۰/۶ و ۴/۹ کیلومتری از محل استقرار قفس ها گسترش پیدا می کند. این فواصل در انتهای دوره دوم پرورش به ترتیب ۲/۹، ۱۴/۳، ۸/۵ و ۸/۴ کیلومتری از منبع مشاهده گردید. روند گسترش خط هم مقدار ۷۰ درصد در راستای شمالی تقریباً تثبیت شده و در محدوده ۳ کیلومتری از منبع نوسان می کند. در این راستا، غلظت فسفات در زمانهای مشابه در سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ به ترتیب ۲/۵، ۲/۹، ۲/۷، ۲/۷ و ۳ کیلومتر از منبع انتشار آلاینده به مقدار ۷۰ درصد غلظت آن در محل قفس ها می رسد. جمع بندی نتایج شبیه سازی های عددی انجام شده برای خطوط هم مقدار ۵۰ درصد، در راستای شمالی نشان می دهد که تقریباً در محدوده ۲ کیلومتری از قفس ها، در انتهای دوره های پرورش ماهی میزان فسفات به ۵۰ درصد آن در محل مزرعه برآورد می گردد. این فاصله برای خطوط هم مقدار ۱۰ درصد در محدوده ۲۰ کیلومتری تثبیت می گردد.

میزان انتشار در راستاهای شرقی و غربی، با اندکی تفاوت قابل اغماض، روند یکسانی را طی می کنند. در راستای شرقی و غربی، در فاصله حدودی در فواصل ۱ تا ۲/۲ کیلومتر از محل قفس ها، غلظت فسفات در انتهای دوره های پرورش ماهی به ۷۰ درصد مقدار آن در منبع انتشار می رسد. خط هم مقدار ۱۰ درصد علی رغم اینکه در انتهای دوره پرورش در راستای شرقی تا ۱۱ کیلومتری و در راستای غربی تا حدود ۶ کیلومتری گسترش پیدا می کند، با اتمام دوره پرورش و ادامه روند انتشار آلاینده های باقی مانده در محیط، در هر دو راستا در محدوده تقریبی ۱۰ کیلومتری از قفس ها تثبیت می گردند.



شکل (۳) میزان انتشار فسفات در لایه ی سطحی در ماه هشتم (الف) و ماه دوازدهم (ب) در سال ۲۰۲۰ در منطقه رویان

Figure 3. Phosphate diffusion in surface layer at the end of August (2020) and September (2020) in the Royan marine basin

## بحث و نتیجه گیری

چنانچه در بخش پیشین تشریح گردید؛ روند انتشار فسفات از محل استقرار قفس ها در ۵ دوره پرورش ماهی از ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی های عددی انجام شده حاکی از آن است که با شروع دوره پرورش ماهی و از ابتدای شروع دوره، انتشار فسفات در اطراف قفس ها روندی افزایشی را تجربه می کند. با بررسی نتایج مدل سازی انجام شده، پس از ۵ دوره پرورش، الگوی تقریباً ثابتی از انتشار در محیط مشاهده گردید. میزان انتشار فسفات در راستای جنوبی به سبب کاهش عمق لایه آب با سرعت بیشتری صورت می گیرد. این انتشار در راستای شمالی کمترین مقدار را داشته و در راستای شرقی-غربی تقریباً به شکلی متوازن رخ می دهد. با اتمام دوره پرورش ماهی و توقف غذادهی، انتشار

فسفات تنها مقادیر قبلی موجود در محیط را شامل می گردد. به این معنی که از محل های نزدیک تر به قفس ها که غلظت آلاینده بیشتر بوده است، به دلیل گردایان افقی غلظت، انتشار به سبب وجود جریان های ناشی از باد و امواج ادامه یافته، سبب گسترش خطوط هم مقدار ۱۰ درصد می گردد. به این معنی که تا فواصل حدودی ۳، ۲۰ و ۱۰ و ۹ کیلومتری از محل استقرار قفس ها، غلظت فسفات به میزان ۱۰ درصد مقدار آن در زمان فعالیت مزرعه می رسد. تخمین دقیق تر عملا در توان مدل عددی مورد استفاده نیست و در میان نویز و خطاهای روش های عددی مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین تغییرات نوسانی میزان انتشار در دوره های مشابه سال - به سبب ثابت نبودن الگوی باد، جریان های ناشی از باد و امواج ناشی از باد که مهمترین عامل در انتشار آلاینده ها در دریای خزر محسوب می گردند- موجب می شوند تا لحاظ عدم قطعیتی بین ۱۵ تا ۲۰ درصد در برآوردهای نهایی ضروری به نظر برسد.

### نتیجه گیری نهایی

در این پژوهش، به بررسی تغییرات زمانی و مکانی انتشار فسفات منتشر شده از قفس های پرورش ماهی واقع در منطقه دریایی رویان واقع در بخش جنوبی دریای خزر با استفاده از یک مدل عددی هیدرودینامیکی سه بعدی مجهز به انتشار آلاینده های محلول در آب دریا پرداخته شد. با استفاده از این مدل و پس از انجام شبیه سازی های عددی متعدد، می توان چنین نتیجه کرد که از زمان احداث مزارع قفس های پرورش ماهی در محیط های دریایی مشابه با منطقه دریایی رویان، میزان انتشار آلاینده های ناشی از حل شدن ضایعات غذای ماهیان در آب دریا، با روندی افزایشی یافته و پس از ۴ تا ۵ دوره ی پرورش متوالی تثبیت می گردد. بدین ترتیب، محدوده تحت تاثیر از انتشار آلاینده ها با در نظر گرفتن شرایط محیطی دریا و با استفاده از مدلسازی عددی قابل تخمین می باشد.

### تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و نیز بنیاد ملی علم ایران تحت قرارداد شماره ۹۸۰۲۴۳۷۴ انجام شده است. از اداره کل شیلات استان مازندران به جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات میدانی مزارع پرورش ماهی قدردانی به عمل می آید.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان این مقاله وجود ندارد.

**منابع مالی:** پژوهش حاضر از حمایت پژوهشی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته است.

**سهم نویسندگان:** حدیقه مفارقی (نویسنده اول)، اجرای مدل، تحلیل نتایج، نگارش مقاله (۴۰٪)، اکبر رشیدی ابراهیم حصاری (نویسنده دوم)، استاد راهنمای دانشجو، طراحی مدل، طراحی شبیه سازی های عددی، نگارش و تصحیح مقاله (۶۰٪)

## Temporal and Spatial variation of the Phosphate diffusion released from Royan Fish Farm Cages located in the Southern Caspian Sea

Hdighesh Mafareghi<sup>1</sup>, Akbar Rashidi Ebrahim Hesari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Marine Physics Department, Faculty of Marine Sciences, Tarbiat Modares University

<sup>2</sup>Marine Biology Department, Faculty of Marine Sciences, Tarbiat Modares University

### ABSTRACT

In this study, the diffusion of phosphate from fish farm cages located in the Royan marine area in the southern part of the Caspian Sea was studied using a 3D hydrodynamic numerical model including diffusion module for dissolved chemical pollutants in seawater. To perform numerical simulations, a bathymetry map with a geographical resolution of 15 arc-seconds, a wind time series with 6-hour intervals, and a monthly average temperature, salinity, and density field were applied to the model. To investigate the diffusion of phosphate released from the Royan fish farm cages, wind-induced currents were simulated in the entire Caspian Sea basin with a spatial resolution of 0.1° and then in the fine-scale model, from the Noor to Noshahr marine area with a geographical resolution of 0.0045°, the phosphate release pattern from the aforementioned cages was investigated in five consecutive fish farming periods from 2016 to 2020. The phosphate pollutant source was applied to the model at the location of the cages in the form of a continuous leak for 8 months and then a 4-month stop until the start of the next period.

**KEYWORDS:** Caspian Sea, Numerical Simulation, Fish Culture, Phosphate Diffusion

### ARTICLE TYPE

Original Research

### ARTICLE HISTORY

**Received:** 05 April 2026

**Revised:** 15 May 2026

**Accepted:** 05 June 2026

**Published Online:** 15 June 2026

\* Corresponding Author:

Email address: akbar.rashidi@modares.ac.ir

Tel: +98(11)44998139

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513