



# Simulation of Phosphate's Diffusion Released by Fish Culture Cages Located in the Sisangan Marine Basin in the Southern Caspian Sea

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Rashidi Ebrahim Hesrai A.<sup>\*1</sup> PhD,  
Bazregar N.<sup>1</sup> MSc,  
Farjami H.<sup>2</sup> PhD

### How to cite this article

Rashidi Ebrahim Hesrai A, Bazregar N, Farjami H. Simulation of Phosphate's Diffusion Released by Fish Culture Cages Located in the Sisangan Marine Basin in the Southern Caspian Sea. Journal of Fisheries Science and Technology. 2020;9(1):1-11.

<sup>1</sup>Marine Physics Department, Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Nur, Iran

<sup>2</sup>Oceanography Center of Caspian Sea, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Sciences, Nowshahr, Iran

### \*Correspondence

Address: Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Nur, Mazandaran, Iran. Postal code: 4641776489.  
Phone: +98 (11) 44999139  
Fax: +98 (11) 44553907  
akbarrashidi@modares.ac.ir

### Article History

Received: March 29, 2020  
Accepted: May 18, 2020  
ePublished: March 14, 2020

## ABSTRACT

**Aims** In the present study, a three-dimensional numerical hydrodynamic model with the capability to simulate the diffusion of chemical pollutants released in marine basins was developed and used as a case study to simulate the diffusion of phosphate released by fish culture cages located in the Sisangan marine basin.

**Materials & Methods** The equations of the model including momentum equations, continuity of mass equation, temperature, salinity, representative of vertical velocity, the tendency of bottom pressure equations and an extra three-dimensional advection-diffusion equation for simulation of pollutant's diffusion rewritten in the earth's spherical coordinates with a vertical Sigma coordinate were solved using finite difference method. To provide the open boundary conditions, the model was used for simulation of wind driven currents in the Caspian Sea from 20 October 2018 to 20 May 2019. For the application of wind field and real geometric condition, it was used the time series of wind fields supplied by ECMWF reanalysis dataset and GEBCO bathymetry with 0.125 degrees resolution and 15 seconds of geographical resolution, respectively.

**Findings** Considering the concentration of 17ppb for the phosphate as a concentration of pollutant in the source of the pollution in the location of the fish culture cages, wind induced currents and the diffusion of the phosphate were simulated for 8 months in both horizontal and vertical directions. The results of the simulations were demonstrated and analyzed within the framework of the horizontal surface current, distribution of the phosphate's concentration in both horizontal and a vertical latitude-depth cross section.

**Conclusion** The phosphate's diffusion is affected by the wind induced currents and after 8 months, it could be extended to the distance of 11, 8.5, 9.5, and 5.7 kilometers far from the cages in eastern, western, southern, and northern directions, respectively. With the generation of vertical velocity and the turbulence effects in the upper layers, phosphate might be diffused in the vertical direction up to 400m depth, as well.

**Keywords** Numerical Model; Phosphate's Diffusion; Fish Culture Cages; Caspian Sea

## CITATION LINKS

[1] ADDSS: A tool for regional aquaculture ... [2] Assessing alternative aquaculture technologies: Life cycle assessment of salmonid ... [3] The political ecology of Chilean salmon aquaculture, 1982-2010: A trajectory from economic ... [4] Cage aquaculture ... [5] Numerical modelling of organic waste dispersion from ... [6] Cage aquaculture: Regional reviews and ... [7] A spatial multi-criteria evaluation for site selection of offshore marine fish farm ... [8] Cage aquaculture ... [9] Chemical fluxes and mass balances ... [10] Chemical fluxes and mass balances ... [11] The environmental impact of marine fish ... [12] The enrichment of a mesotrophic lake by carbon, phosphorus and nitrogen from the cage ... [13] Water quality issues associated with aquaculture: A case study in Minnesota Mine pit lakes [14] Aquaculture-derived enrichment of hexachlorocyclohexanes (HCHs) and dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) in ... [15] Marine cage culture and the environment: Effects on water quality ... [16] Main frame study for sea cage culture ... [17] Waste distribution modelling based on geographical information systems of fish farm Cages of Bahalwainagar ... [18] Numerical simulation of the wind-induced current ... [19] Principles of ocean physics ... [20] Association between winter precipitation and water level fluctuations ... [21] Digenetic models and their implementation ... [22] Hydrochemistry and nutrient distribution in southern deep-water ...

## شبیه‌سازی انتشار فسفات منتشرشده از قفس‌های پرورش ماهی واقع در منطقه دریایی سیسنگان در بخش جنوبی دریای خزر

اکبر رشیدی ابراهیم حصاری\* PhD

گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

نوید بزرگر MSc

گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

حسین فرجامی PhD

مرکز اقیانوس‌شناسی دریای خزر، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، نوشهر، ایران

### چکیده

**اهداف:** در مطالعه حاضر پایه یک مدل عددی سه بعدی هیدرودینامیکی با قابلیت شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های شیمیایی منتشرشده در محیط‌های دریایی طراحی و در قالب یک مطالعه موردی برای شبیه‌سازی انتشار فسفات از قفس‌های پرورش ماهی در منطقه دریایی سیسنگان مورد آزمایش قرار گرفت. **مواد و روش‌ها:** معادلات مدل شامل معادلات تکانه، معادله پیوستگی، دما، شوری، معرف سرعت قائم، تمایل فشار کف، همچنین یک معادله سه بعدی فرارقت- انتشار برای شبیه‌سازی انتشار آلاینده در دستگاه مختصات کروی زمین با آرایه قائم سیگما با استفاده از روش تفاضل متناهی حل شدند. برای اعمال شرایط مرزی در مرزهای باز، مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از باد در کل دریای خزر از آبان ۱۳۹۷ تا خرداد ۱۳۹۸ اجرا شد. برای اعمال میدان باد از داده‌های بازتحلیل مدل ECMWF با دقت ۱۲۵/۰ درجه استفاده شد. برای اعمال شرایط هندسی محیط، داده‌های عمق‌سنجی GEBCO با تفکیک ۱۵ ثانیه جغرافیایی مورد استفاده قرار گرفتند.

**یافته‌ها:** با در نظر گرفتن مقدار غلظت ۱۷ppb برای فسفات به‌عنوان غلظت آلاینده در چشمه آلودگی در محل استقرار قفس‌های پرورش ماهی، جریان‌های ناشی از باد، همچنین انتشار فسفات در راستای افقی و قائم در محیط مورد مطالعه به مدت ۸ ماه شبیه‌سازی شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در قالب میدان جریان افقی در لایه سطحی، میدان غلظت فسفات در راستای افقی، همچنین در راستای قائم و در یک برش شمالی- جنوبی ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفتند. **نتیجه‌گیری:** الگوی انتشار فسفات در راستای افقی متأثر از جریان‌های ناشی از باد است و می‌تواند پس از گذشت ۸ ماه در راستاهای شرقی، غربی، جنوبی و شمالی به ترتیب تا فواصل حدوداً ۱۱، ۸/۵، ۹/۵ و ۵/۷ کیلومتری از قفس‌ها گسترش پیدا کند. در راستای قائم نیز به دلیل شکل‌گیری جریان‌های قائم و تلاطم در لایه‌های بالایی، فسفات علاوه بر انتشار افقی، می‌تواند تا اعماق ۴۰۰ متری نیز انتشار یابد. **کلیدواژه‌ها:** مدل عددی، انتشار فسفات، قفس پرورش ماهی، دریای خزر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

\*نویسنده مسئول: akbar.rashidi@modares.ac.ir

### مقدمه

امروزه در کشورهای در حال توسعه، آبی‌پروری دریایی به‌عنوان یک منبع غذایی حاوی پروتئین با ارزش بیولوژیکی بالا و نسبتاً ارزان قلمداد می‌شود [1]. به این دلیل، دریاچه‌ها و مخازن آبی به‌طور

فزاینده‌ای برای پرورش ماهی مورد استفاده قرار می‌گیرند [2,3]. تحقیقات بنیادی پرورش ماهی در قفس از حدود ۷ دهه گذشته در ژاپن آغاز شد و در سال ۱۹۶۰ این صنعت به توسعه مطلوب رسید. این سیستم پرورش در سال ۱۹۷۰ در تایلند و در سال ۱۹۸۰ در فیلیپین ادامه یافت. از حدود سال‌های ۱۹۷۰ میلادی، نروژ از پیشگامان تجاری‌سازی صنعت پرورش ماهیان در قفس مطرح شد. شایان ذکر است که امروزه تجارت دریایی یکی از بزرگ‌ترین صنایع صادراتی در نروژ پس از نفت و گاز است. بیش از ۵۰٪ ماهی مصرفی در جهان در قفس‌های پرورش ماهی تولید می‌شوند [4,5].

پرورش ماهیان در قفس نقش بسیار مهم و موثری در توسعه آبی‌پروری در دنیا به‌ویژه در ۳۰ سال اخیر داشته است. این نوع پرورش، از سیستم‌های جدید پرورش آبزیان در محیط‌های محصور است که به دلیل تقاضای جهانی به تولیدات آبزیان و محدودیت منابع آب‌های شیرین در نیم قرن اخیر، رشد فزاینده‌ای یافته است و در حال حاضر به‌عنوان یکی از سریع‌ترین روش‌ها در پاسخ به نیاز جهانی به منابع پروتئینی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود [6]. علاوه بر مزایای آبی‌پروری دریایی، از سویی دیگر اثرات منفی زیست‌محیطی این صنعت نیز در سنوات گذشته در کانون توجه محققان محیط زیست قرار گرفته است. از اثرات منفی آبی‌پروری دریایی می‌توان کاهش کیفیت آب اکوسیستم‌های آبی، همچنین تخریب احتمالی ذخایر طبیعی آبزیان را برشمرد [7].

در بررسی سایت‌های پرورش ماهی در دریا در نظر گرفتن کیفیت آب، اجزای رسوب و پارامترهای زیستی اهمیت بسیار بالایی دارد [8]. براساس پژوهش‌های انجام‌شده در پرورش ماهی آزاد، سالانه حدود ۵۴-۴۷٪ فسفر و ۲۳٪ نیتروژن موجود در غذا، به شکل مواد معلق و رسوبات در محیط آبی حل یا ته‌نشین می‌شوند [9,10]. وو دریافت که ۲۱٪ نیتروژن و ۵۳٪ فسفر موجود در غذای ماهیان در مزارع پرورش ماهی در قفس همراه با رسوبات ته‌نشین می‌شود [11]. در مطالعه‌ای دیگر مشخص شد که در ازای هر تن تولید ماهی، حدود ۳۰۰-۲۵۰ کیلوگرم مواد معلق حاصل از مدفوع ماهیان و باقیمانده غذا به محیط بر می‌گردد. همچنین گزارش شد که به ازای هر کیلو ماهی آزاد در قفس ۲۳٪/کیلوگرم فسفر و ۱۰٪/کیلوگرم نیتروژن به محیط آبی اطراف اضافه می‌شود [12]. کاسلر و همکاران نشان دادند که رسوبات سیاه رنگی که در زیر قفس‌های پرورش ماهی تجمع می‌یابند، دارای میزان کربن و سطوح نیتروژن و فسفر بالا و نیز سمی هستند. فسفر، نیتروژن و کربن در رسوبات ته‌نشین شده حاصل از مواد دفعی و ضایعات غذایی است [13].

فعالیت‌های آبی‌پروری در قفس، حجم بالایی از مواد مغذی، مواد معلق و آلی را در آب و رسوبات محیط وارد می‌کند. ترکیب شدن مواد مغذی رسوبات در مجاورت قفس در جهان متداول است، به‌طوری که در هنگ‌کنگ این میزان در رسوبات نسبت به مزرعه پرورش مرجع ۱۳ برابر بیشتر بوده است [14]. بنابراین، با توجه به حجم بالای خروجی مزارع پرورش ماهی در قفس و پیشگیری از

از محل قرارگیری قفس‌ها، انتشار این آلاینده در محیط دریایی اطراف قفس‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. انتخاب این دوره زمانی به دلیل هماهنگی با طول دوره زمانی ۸ ماهه پرورش ماهی در مزرعه پرورش ماهی واقع در منطقه دریایی سیسنگان در نظر گرفته شده است. طبیعی است در صورت تداوم مستمر دوره پرورش ماهی در مزرعه مورد اشاره، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نیز نیازمند بازبینی و بررسی‌های دقیق‌تری خواهد بود.

مطالعه حاضر حاوی نکات جدیدی در مورد محاسبه پتانسیل توزیع آلاینده‌های ناشی از صنعت پرورش ماهی در قفس و همچنان دارای ارزش زمانی است. اگرچه در محیط زنده که ترکیبات شیمیایی در مدیای متفاوتی از جمله میکروارگانیسم‌ها و شرایط پویای دریایی قرار می‌گیرد، مطالعه یک آلاینده مغذی مانند فسفات که مطابق قانون مینیمم لیبیگ در رشد و شکوفایی جلبک‌ها موثر است صرفاً از مدل‌های ریاضی پیش‌بینی‌شده پیروی نمی‌کند، اما طبیعی است که در یک محیط سترون و فاقد موجود زنده به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

### روش‌های عددی و جزئیات حل معادلات مدل

در مطالعه حاضر به‌منظور بررسی انتشار آلاینده‌های منتشرشده از قفس‌های پرورش ماهی یک مدل عددی هیدرودینامیکی-اکولوژیکی مبتنی بر معادلات مقدم بازنویسی‌شده در دستگاه کروی زمین با آرایه قائم سیگما طراحی شد. این مدل توانایی پیش‌بینی میدان‌های جریان افقی و قائم، چگالی، دما، شوری، تمایل فشار کف، ژئوپتانسیل و غلظت آلاینده‌های شیمیایی محلول در آب دریا را در لایه‌های مختلف (و متناظر با آن، در اعماق مختلف) و توزیع مکانی افقی دلخواه دارد. معادلات حاکم در این مدل شامل معادله حرکت در راستای شرق‌سوی و شمال‌سوی، معادله‌های پیوستگی، دما، شوری، حالت برای آب دریا، فرارفت انتشار مربوط به انتشار آلاینده شیمیایی فسفات و معادلات تکمیلی متناسب با تبدیل مختصات از دستگاه دکارتی به دستگاه کروی زمین با آرایه قائم سیگما هستند [18].

پیش از معرفی معادلات مدل، به معرفی مدل‌های سه بعدی و آرایه سیگمای استفاده‌شده در این مطالعه پرداخته خواهد شد. چنانچه حداقل یکی از فراسنج‌های اقیانوس‌شناختی در راستای قائم لایه‌های متفاوت تغییر یابد، برای بررسی آن فراسنج نیاز به حل سه بعدی معادلات حاکم خواهد بود. در مطالعه حاضر، با توجه به اینکه تغییرات زیادی در مقدار سرعت جریان‌ات ناشی از باد، میدان دما و فشار وجود دارد، از یک مدل عددی با ساختار سه بعدی با تفکیک ده لایه استفاده می‌شود. در مدل‌های چند لایه که محیط مورد مطالعه دارای کف ناتراز است، نیاز است در تمامی پهنه محیط اقیانوسی تعداد لایه‌ها را یکسان در نظر گرفت. این امر مستلزم استفاده از یک آرایه قائم نرمال‌شده تحت عنوان سیگما به جای استفاده از فاصله شعاعی از مرکز زمین (F) است. در مطالعه حاضر

شکوفایی محتمل، ضروری است مقادیر مواد مغذی آب و رسوبات منطقه دریایی پرورش، پایش شود تا نقش اثرات اکولوژیکی حاصل از مزارع و قفس‌های پرورش ماهی به‌طور دقیق مشخص شود [15]. در مجموع می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که آبی‌پروری دریایی علی‌رغم مزایای اقتصادی دارای اثرات مخرب و منفی زیست‌محیطی نظیر کاهش کیفیت اکوسیستم‌های آبی و تخریب ذخایر طبیعی نیز است [7].

در ایران صنعت پرورش ماهی در قفس، برخلاف پرورش ماهی در استخرهای خاکی قدمت زیادی ندارد. در سال‌های اخیر پرورش ماهی در قفس در دریای خزر نیز مورد توجه سرمایه‌گذاران قرار گرفته است. نوار ساحلی در حوزه جنوبی دریای خزر، خلیج و دماغه ندارد و در واقع مکان امنی برای استقرار قفس‌های پرورش ماهیان دریایی وجود ندارد. در نتیجه قفس‌ها باید در فضای آزاد دریا و دور از ساحل قرار گیرند [16]. برای پیش‌روی به سمت توسعه پایدار محیط زیست، ابزارهایی برای ارزیابی خطرات زیست‌محیطی 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 [15]. در این زمینه، از مدل‌های عددی به‌عنوان یکی از قوی‌ترین، مقرون به صرفه‌ترین و کارآمدترین ابزارها برای مدل‌سازی ورودی، توزیع و تخلیه پسماندها به‌منظور پیش‌بینی و پشتیبانی تصمیم‌سازی‌های لازم یاد می‌شود. شبیه‌سازی پراکندگی مواد شیمیایی منتشرشده از مزارع پرورش ماهی در راستای مدیریت اثرات آلودگی، بیماری‌های دریایی ناشی از آن و حاصل‌شدن اطمینان از رعایت استانداردهای کیفیت محیط (EQS) ضروری است [17].

مطالعات هیدرواکولوژیکی در سال‌های اخیر مورد توجه مدل‌سازان قرار گرفته است. اضافه‌کردن مدول‌های رهگیری ذرات و انتشار آلاینده‌ها در محیط‌های دریایی اخیراً در ساختار مدل‌های هیدرودینامیکی جهانی و منطقه‌ای نظیر FVCOM و ROMS قرار داده شده‌اند و در اغلب موارد، مراحل آزمایشی خود را طی می‌کنند. پیش از این انجام این نوع پژوهش‌ها با اجرای یک مدل هیدرودینامیک و یک مدل کنترل کیفیت آب (یک یا دو بعدی) انجام می‌شد. علی‌رغم گسترش مدل‌سازی‌های هیدرواکولوژیکی، تاکنون مدلی بومی در محدوده آب‌های پیرامونی ایران طراحی و مورد استفاده قرار نگرفته است.

در این مطالعه، پایه یک مدل هیدرودینامیکی مجهز به بررسی انتشار سه بعدی آلاینده‌های منتشرشده در محیط‌های دریایی از جمله آلاینده‌های محلول در آب دریا و آلاینده‌های معلق در آن طراحی شده است. برای آزمایش عملکرد این مدل، انتشار فسفات به‌عنوان یکی از آلاینده‌های منتشرشده از قفس‌های پرورش ماهی در بخش جنوبی دریای خزر مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل مبتنی بر معادلات مقدم شامل معادلات تکانه، پیوستگی، دما، شوری، حالت و همچنین یک معادله فرارفت-انتشار سه بعدی برای شبیه‌سازی انتشار آلاینده فسفات است و به مدت ۸ ماه از شروع انتشار آلاینده

این آرایه به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$\sigma = \frac{p - p_A}{p_b - p_A} \quad (1)$$

$\sigma$  آرایه قائم نرمال شده،  $p$  فشار در هر نقطه از محیط،  $p_A$  فشار جو و  $p_b$  فشار بستری است. مقدار  $\sigma$  در سطح دریا برابر با صفر، در بستر دریا برابر با یک و در اعماق مختلف بین سطح تا کف بین صفر تا یک است. در این مطالعه، تمامی معادلات حاکم ذکر شده در دستگاه کروی زمین با آرایه قائم سیگما بازنویسی شده‌اند. بدین ترتیب معادلات مدل به شکل زیر خواهند بود:

مولفه شرقی سرعت افقی (۲)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} = \frac{uv \tan \phi}{r} + \frac{vw}{r} + f_v - ew - \frac{\alpha}{r \cos \phi} \left[ \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right) \right] + F_{r,s}$$

مولفه شمالی سرعت افقی (۳)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial v}{\partial \sigma} = -\frac{u^2 \tan \phi}{r} - \frac{vw}{r} - fu - \frac{\alpha}{r} \left[ \frac{\partial p}{\partial \phi} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \right) \right] + F_{r,\phi}$$

معادله پیوستگی (۴)

$$\frac{1}{(p_b - p_A)} \frac{D}{Dt} (p_b - p_A) + \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$$

معادله‌ی حالت برای آب دریا (۵)

$$\rho(s, T, p) = \frac{\rho(s, T, 0)}{1 - p / K_T(s, T, p)}$$

معادله محاسبه ژئو پتانسیل (۶)

$$\Phi(\lambda, \phi, \sigma) = \Phi(\lambda, \phi, 1) + \frac{(p_b - p_A)(1 - \sigma)}{\langle \rho \rangle}$$

معادله محاسبه فاصله شعاعی از مرکز زمین (۷)

$$r_{(i,j,k)} = r_{(i,j,\sigma=1)} + \frac{p_b - p_A}{g} \frac{(1 - \sigma)}{\langle \rho \rangle}$$

معادله تمایل فشار کف (۸)

$$\frac{\partial p_b}{\partial t} = - \int_0^1 \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial [(p_b - p_A)u]}{\partial \lambda} d\sigma - \int_0^1 \frac{1}{r} \frac{\partial [(p_b - p_A)v]}{\partial \phi} d\sigma$$

معادله محاسبه معرف سرعت قائم (۹)

$$\alpha(\sigma) = \frac{1}{p_b - p_A} \int_0^\sigma \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial [(p_b - p_A)u]}{\partial \lambda} d\sigma - \frac{1}{p_b - p_A} \int_0^\sigma \frac{1}{r} \frac{\partial [(p_b - p_A)v]}{\partial \phi} d\sigma - \frac{\sigma}{p_b - p_A} \frac{\partial p_b}{\partial t}$$

معادله شوری (۱۰)

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial s}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial s}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial s}{\partial \sigma} = \left\{ \frac{\alpha}{r^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ \frac{K_{s,\lambda}}{\cos \phi} \left[ \frac{\partial(\rho s)}{\partial \lambda} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial(\rho s)}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right) \right] \right] \right] \right\} + \left\{ \frac{\alpha}{r^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ K_{s,\phi} \cos \phi \left[ \frac{\partial(\rho s)}{\partial \phi} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial(\rho s)}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \right) \right] \right] \right] \right\} + \left\{ \frac{\alpha}{r^2 \cos \phi} \left[ \frac{\rho g^2 \cos \phi}{(p_b - p_A)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ K_{s,r} r^2 \rho \frac{\partial(\rho s)}{\partial \sigma} \right] \right] \right\}$$

معادله دما (۱۱)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma} = \frac{1}{c_p} \left[ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial q}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial q}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right] + \frac{\alpha a_r T}{c_p} \left[ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right] + \frac{1}{s \tau_r} \left[ \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial s}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial s}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right]$$

و در نهایت معادله فرارفت- انتشار مربوط به انتشار آلاینده فسفات منتشر شده از قفس پرورش ماهی مشابه با معادله شوری [19] پس از بازنویسی در دستگاه مختصات کروی زمین با آرایه قائم سیگما به شکل زیر خواهد بود:

(۱۲)

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial P}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial P}{\partial \sigma} = \left\{ \frac{\alpha}{r^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ \frac{K_{P,\lambda}}{\cos \phi} \left[ \frac{\partial(\rho P)}{\partial \lambda} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial(\rho P)}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right) \right] \right] \right] \right\} + \left\{ \frac{\alpha}{r^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ K_{P,\phi} \cos \phi \left[ \frac{\partial(\rho P)}{\partial \phi} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial(\rho P)}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \right) \right] \right] \right] \right\} + \left\{ \frac{\alpha}{r^2 \cos \phi} \left[ \frac{\rho g^2 \cos \phi}{(p_b - p_A)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ K_{P,r} r^2 \rho \frac{\partial(\rho P)}{\partial \sigma} \right] \right] \right\} + S_p$$

در معادله ۱۲،  $P$  معرف غلظت فسفات؛ جملات سمت چپ معادله به ترتیب نشانگر تغییرات محلی، فرارفت افقی و فرارفت قائم غلظت فسفات؛ دو جمله داخل کروشه سمت راست انتشار تلاطمی آلاینده  $P$  در راستای افقی؛ جمله سوم انتشار تلاطمی در راستای قائم و بالاخره جمله آخر سمت راست، مربوط به غلظت فسفات در محل قرارگیری قفس‌ها است. همچنین پارامترهای  $\rho$ ، چگالی؛  $u$ ، سرعت جریان در راستای شرقی؛  $v$ ، سرعت جریان در راستای شمالی؛  $\sigma$ ، معرف سرعت قائم؛  $K_{P,\lambda}$  و  $K_{P,\phi}$  ضرایب انتشار تلاطمی فسفات در راستای افقی؛  $K_{P,\sigma}$  ضریب انتشار تلاطمی فسفات در راستای قائم و  $S_p$ ، جمله چشمه و برابر با غلظت فسفات در محل قرارگیری قفس‌ها است.

برای حل عددی معادلات مدل از روش تفاضل متناهی استفاده شد. بدین ترتیب که برای گسسته‌سازی جملات فرارفتی از طرح‌واره‌های عددی دوگامی لکس- وندروف و ماتسونو، همچنین برای جملات انتشاری از طرح‌واره دو فوریت- فرانکل استفاده شد. معادلات مدل بر روی شبکه آراکاوای C تبدیل یافته گسسته‌سازی شدند. گام زمانی

رسوبات محلول در آب، ضرایب انتشاری مختلفی با توجه به خصوصیات هر یک از مواد شیمیایی منتشرشده از قفس‌ها، برای اعمال به مدل‌هایی نظیر مدل به‌کاررفته در این مطالعه به دست آمد که این ضرایب برای استفاده در این مدل به‌منظور شبیه‌سازی انتشار فسفات ناشی از قفس‌های پرورش ماهی انتخاب شدند.

#### منطقه مورد مطالعه

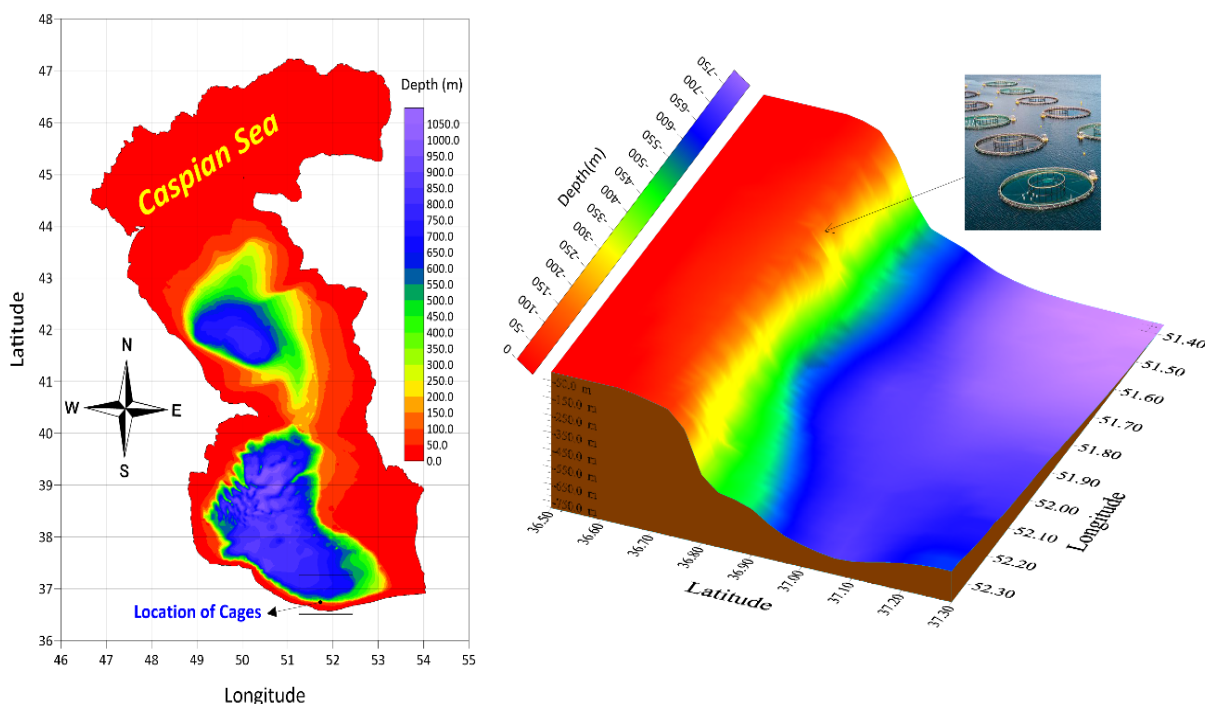
دریای خزر بزرگ‌ترین دریاچه روی کره زمین است که در همسایگی کشورهای ایران، روسیه، آذربایجان، ترکمنستان و قزاقستان واقع شده و بین طول‌های جغرافیایی ۶۷/۶ و ۵۴/۸ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶/۶ و ۴۷ درجه شمالی گسترده شده است. این دریاچه، هیچ خروجی سطحی ندارد و همانند دیگر دریاچه‌های بسته، تراز سطح آن به تعادل میان بارش، تبخیر و ورودی رودخانه‌ها بستگی دارد که مستقیماً با چرخه جوی مرتبط است. بنابراین به‌دلیل مساحت زیاد و حجم آب، حساسیت دریای خزر به تغییرات آب هوایی، می‌تواند به‌عنوان شاخص خوبی برای مشاهده تغییرات آب و هوایی از طریق تغییر در سطح آب آن قلمداد شود [20].

مزرعه پرورش ماهی در قفس در این مطالعه، در محدوده دریایی سیسنگان در جنوب دریای خزر است. این منطقه بین طول جغرافیایی ۵۱/۳۶ تا ۵۲/۳۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی بین ۳۶/۵۰ تا ۳۷/۳۰ درجه شمالی واقع شده است (شکل ۱). منبع اصلی انتشار فسفات در موقعیت قرارگیری قفس‌های پرورش ماهی به مختصات طول جغرافیایی ۵۱/۷۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶/۷۶ درجه شمالی، در نظر گرفته شده است. مرز جنوبی در این منطقه مشرف به ساحل و خشکی است و سایر مرزهای شرقی، غربی و شمالی درون آب قرار دارند و مرز باز هستند.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده ۱۵ ثانیه و گام مکانی در راستای شرق‌سوی و شمال‌سوی برابر با ۰/۰۰۴ درجه جغرافیایی متناسب با شبکه محاسباتی در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر انتشار در راستای قائم و بازتولید دقیق‌تر فرآیندهای در راستای قائم، از جمله فراجوشی و فروجوشی ناشی از واگرایی و همگرایی میدان جریان افقی، محیط مورد مطالعه در راستای قائم به ۱۰ لایه تقسیم شده است.

ابتدا جریان‌ات بادرانده با به‌کاربردن معادلات مقدم و با استفاده از روش تفاضل متناهی در یک محیط ۱۰ لایه شبیه‌سازی شدند و به‌طور همزمان برای آلاینده فسفات، یک معادله فرارفت- انتشار نیز حل شد. شیوه حل معادله اخیر مشابه با حل عددی معادله شوری است. از نظر هیدرودینامیکی از آنجایی که فسفات همانند شوری در آب دریا محلول است، معادله به‌کاررفته برای پیش‌بینی انتشار فسفات در محیط، مشابه با معادله شوری دارای بخش‌های فرارفتی، انتشاری، جملات چشمه و چاه است. از آنجایی که براساس تعریف، شوری آب دریا، املاح محلول در آب دریا با ترکیبات مختلف را شامل می‌شود، طبیعتاً انتشار شوری و فسفات با ضرایب انتشار مولکولی و پیچیده‌ای متفاوتی انجام می‌شود. بنابراین لازم است در استفاده از این معادله، ضرایب انتشار مربوط به فسفات را که براساس مطالعات صورت‌گرفته آزمایشگاهی فراسنجی شده‌اند، مورد توجه قرار داد.

شبیه‌سازی‌های عددی با اعمال ضرایب انتشاری متفاوت برای هر ماده شیمیایی در آب دریا انجام شد. در مطالعه‌ای که در رابطه با مواد شیمیایی انتشاریافته از رسوبات قفس‌های پرورش ماهی در آب دریا انجام گرفت، در نتیجه فرآیند دیانز انجام‌شده بر روی



شکل ۱) نقشه بسیمتری دریای خزر (سمت چپ) و منطقه مورد مطالعه واقع در بخش جنوبی دریای خزر (سمت راست)

استفاده شد [21].

برای حل عددی معادلات مدل از کدنویسی به زبان C++ استفاده شد. در این مدل، یک تابع اصلی و ۱۲ تابع فرعی برای حل عددی هر کدام از معادلات، همچنین توابعی برای ورود اطلاعات ورودی مدل، ذخیره اطلاعات خروجی شامل میدان جریان افقی و قائم، تراز آب دریا و اختلاف آن از ترازمندی ایستا، ژئوپتانسیل، میدان غلظت فسفات، میدان دما و شوری، همچنین چگالی آب دریا مورد استفاده قرار گرفته است. گام مکانی برای شبیه‌سازی نهایی ۱۵ ثانیه و گام مکانی برابر با ۰/۰۰۴ درجه جغرافیایی در راستای شرق‌سوی و شمال‌سوی و در راستای قائم تفکیک ۰/۰۵ برای سیگما در نظر گرفته شده است.

### یافته‌ها

چنانچه ذکر شد، در این مطالعه میزان غلظت فسفات در منبع رهاسازی آن (یا آنچه در این مطالعه چشمه آلودگی قلمداد می‌شود) با توجه به اندازه‌گیری میدانی انجام شده برابر ۱۷ppb در نظر گرفته شد. غلظت این ماده شیمیایی در محیط‌های دریایی و اقیانوسی از جمله در دریای خزر از مرتبه جزء در میلیون گزارش شده است [22]. در طول دوره شبیه‌سازی فرض شده است که فسفات ناشی از هدررفت غذای آبزیان به‌طور پیوسته در محل فرارگیری قفس‌ها در آب دریا حل شده است و توسط نیروهای وارده بر بدنه توده آب با فرآیندهای انتشار مولکولی و انتشار تلاطمی، در محیط منتشر می‌شود. در این بخش به تحلیل نتایج شبیه‌سازی عددی انتشار فسفات از قفس‌های پرورش ماهی در طول هشت ماه و از اواسط ماه اکتبر سال ۲۰۱۸ میلادی تا اواسط ماه می ۲۰۱۹ پرداخته می‌شود. از آنجایی که دریای خزر یک حوضه دریایی بسته است، نیروی کشندی موثر بر بدنه آبی آن ناچیز است و نوسانات تراز آب دریا و جریان‌ات متناظر با آن، یعنی جریان‌ات کشندی قابل چشم‌پوشی هستند. بدین ترتیب نیروهای موثر بر هیدرودینامیک دریای خزر را باد، ورودی رودخانه‌ها و مولفه‌های جوی نظیر بارش و تبخیر تشکیل می‌دهند. از آنجایی که عوامل جوی و ورودی رودخانه‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه در شکل‌گیری پدیده‌های با مقیاس زمانی کوتاه تاثیر قابل توجهی ندارند، بنابراین مهمترین عامل در انتشار فسفات یا هر آلاینده دیگر در بازه‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه، نیروی باد است. در این بخش به تشریح نتایج شبیه‌سازی جریان‌ات ناشی از باد پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که انتشار فسفات، به‌شدت تحت تاثیر جریان‌ات محلی ناشی از باد است و در راستای حرکت جریان‌های ناشی از باد، انتشار این فراسنج شدیدتر است. در شکل ۲، جریان‌ات ناشی از باد شبیه‌سازی شده توسط مدل، در انتهای ماه‌های دوم، چهارم، ششم و هشتم، در ساعت ۲۴ به‌عنوان نمونه نشان داده شده است. نمایش الگوی جریان ناشی از باد در ساعت‌های خاص به جای نمایش الگوی جریان‌های میانگین هفتگی، ماهانه یا فصلی بدین دلیل انجام شده است که در شکل‌گیری و تداوم پدیده‌های اقیانوسی نظیر انتشار آلاینده‌ها،

در سال‌های اخیر پرورش ماهی در قفس در دریای خزر گسترش یافته و در بخش جنوبی آن در مناطق مختلفی از جمله منطقه دریایی سیسنگان فعالیت‌های آبی‌پروری دریایی در حال انجام است. با توجه به اطلاعات اظهارشده توسط مدیریت مزرعه پرورش ماهی در منطقه دریایی سیسنگان، قفس‌های منطقه دریایی این مکان از نوع قفس گرد از جنس پلی‌اتیلنی فشار قوی به تعداد پنج عدد و طول دوره پرورش از حدود آبان‌ماه تا خردادماه یعنی حدود هشت ماه است. در ابتدای دوره پرورش بچه ماهی با وزن ۱۰۰ گرم به تعداد ۳۰۰۰۰ قطعه به هر کدام از قفس‌ها ریخته می‌شود. در انتهای دوره پرورش وزن متوسط ماهی‌ها به حدود ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ گرم می‌رسد.

### اطلاعات و داده‌های استفاده‌شده

اطلاعات عمق‌سنجی مربوط به دریای خزر از بانک اطلاعاتی GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) با تفکیک ۱۵ ثانیه جغرافیایی استخراج شد و برای اعمال به مدل و تهیه شبکه محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین اطلاعات باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح، در طول بازه شبیه‌سازی از تاریخ ۱۳۹۷/۰۸/۰۱ تا ۱۳۹۸/۰۴/۳۱ با تفکیک ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی از بانک اطلاعاتی (European Centre for Medium- ECMWF Range Weather Forecasts) به شکل سری زمانی ۶ ساعته اخذ و پس از درون‌یابی بر روی شبکه محاسباتی به مدل اعمال شد. اطلاعات مربوط به دما و شوری از پایگاه داده‌ای (World WOA Ocean Atlas) استخراج شد و برای محاسبه میدان چگالی براساس معادله حالت برای آب دریا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین براساس نمونه‌برداری انجام شده از مجاورت قفس‌های پرورش ماهی و آنالیز این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر هیئت‌چای مدل U-3000، مقدار غلظت فسفات در محل چشمه آلودگی برابر با ۱۷ppb در نظر گرفته شد. این نمونه‌برداری در آذرماه ۱۳۹۷ و یک‌بار انجام شد و در زمان نمونه‌برداری از آب دریا شرایط دریا تقریباً آرام بود و ارتفاع موج در منطقه فرارگیری قفس‌ها به‌طور تقریبی بین نیم تا یک‌متر تخمین زده شد.

### شبیه‌سازی عددی

در شبیه‌سازی نخست، با اعمال میدان باد جریان‌ات ناشی از باد به مدت ۸ ماه در کل دریای خزر با تفکیک ۲ دقیقه جغرافیایی شبیه‌سازی شد. هدف از این شبیه‌سازی محاسبه میدان فراسنج‌های مختلف در مرزهای باز منطقه مورد مطالعه (منطقه دریایی سیسنگان) است. بدین ترتیب در اجرای اصلی با تفکیک ۰/۰۰۴ درجه جغرافیایی، برای مرز باز از اطلاعات خروجی شبیه‌سازی اول استفاده شد.

در مرحله بعد، شبیه‌سازی جریان‌ات ناشی از باد، همچنین انتشار فسفات از چشمه در نظر گرفته شده به مدت ۸ ماه شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی از ضریب انتشار فسفات با در نظر گرفتن عوامل موثر نظیر دما، شوری و چگالی محیط برابر با  $116 \times 10^{-7}$  مترمربع بر ثانیه

در راستای قائم نیز قوت می‌گیرد. بدین ترتیب، علاوه بر انتشار فسفات در راستای عمق بر اثر جریانات قائم و تلاطم در لایه سطحی، سرعت جریان افقی در لایه‌های پایین تر نیز در انتشار فسفات در راستای افقی ایفای نقش می‌کنند. نمایه‌های قائم ترسیم شده در شکل ۴ تاییدی بر این موضوع هستند.

میزان انتشار فسفات در لایه سطحی در انتهای ماه‌های دوم تا هشتم در شکل ۳ نمایش داده شده است. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، در هر چهار نمودار گسترش شرقی- غربی و جنوبی میزان انتشار فسفات بیشتر بوده است. این امر به تبعیت الگوی جریانات سطحی و الگوی باد غالب در منطقه مورد مطالعه است. الگوی باد غالب در بخش جنوبی دریای خزر براساس مطالعات انجام شده، شمالی، غربی و شمال غربی است. انتظار می‌رود جریانات ناشی از باد نیز توافق کامل با وزش باد داشته باشند. بدین ترتیب شکل نامتقارن الگوی انتشار فسفات قابل تفسیر خواهد بود. برای راحتی تفسیر، خط هم‌مقدار غلظت فسفات به مقدار برابر با  $1/7 \text{ppb}$  (غلظت برابر با ۱۰٪ مقدار غلظت فسفات در محل چشمه انتشار) در هر کدام از شکل‌ها ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۳- الف مشاهده می‌شود، با گذشت دو ماه از شروع انتشار فسفات، در جهت شرقی و غربی از محل چشمه انتشار فسفات، در فاصله حدوداً  $0/4$  کیلومتری مقدار غلظت فسفات به میزان ۱۰٪ غلظت آن در چشمه آلودگی رسیده است. این مقدار در راستای شمالی و جنوبی به ترتیب تا فواصل  $2/9$  و  $0/1$  کیلومتری گسترش یافته است. همچنین به فاصله  $2/14$  کیلومتری به سمت شرق،  $2/23$  کیلومتری به سمت غرب،  $1/02$  کیلومتری به سمت شمال و  $2/05$  کیلومتر به سمت جنوب، غلظت فسفات به ۵۰٪ غلظت آن در چشمه انتشار رسیده است. خط هم‌مقدار  $8/0 \text{ppb}$  (معادل ۵۰٪ غلظت فسفات در چشمه انتشار فسفات) در انتهای ماه‌های چهارم، ششم و هشتم در راستای شرقی سوی از منبع، به ترتیب در فواصل  $4/37$ ،  $0/35$  و  $0/03$  کیلومتری از چشمه انتشار رسیده است. خط هم‌مقدار ۱۰ درصدی نیز در انتهای ماه‌های چهارم، ششم و هشتم، در راستای غربی به فواصل  $7/0$ ،  $9/8$  و  $10/9$  کیلومتری از منبع کشیده شده است. قابل توجه است که خط هم‌مقدار ۱۰ درصدی، در انتهای ماه هشتم، در راستای غرب، شمال و جنوب، به ترتیب در فواصل  $8/0$ ،  $0/7$  و  $9/0$  کیلومتری از منبع قرار گرفته است.

در شکل ۴، میزان انتشار فسفات در راستای قائم و برش شمالی- جنوبی نمایش داده شده است. طبق شکل، در انتهای ماه دوم، خط هم‌مقدار  $1/7 \text{ppb}$  تا عمق  $100$  متری گسترش یافته است، این در حالی است که مقدار فسفات به مقدار ۵۰٪ منبع انتشار، در اعماق  $40$  تا  $50$  متری رسیده است. گرچه محل استقرار قفس‌ها در اعماق حدود  $60$  متری است، انتشار فسفات در راستای شمالی- جنوبی به همراه تلاطم در لایه سطحی و جریانات قائم شکل گرفته به دلیل همگرایی میدان باد و جریانات افقی در لایه‌های سطحی، به اعماق پایین توسعه پیدا کرده است. با گذشت زمان، انتشار در راستای قائم تداوم یافته و در انتهای ماه چهارم به اعماق بالای  $200$  متری

حرکت لکه‌های نفتی، همچنین آلودگی‌های معلق در سطح یا بدنه آب دریا، تأثیرات کوتاه‌مدت و حتی ساعتی نیروهایی نظیر باد هستند که ایفای نقش می‌کنند.

چنانچه در شکل ۲- الف مشاهده می‌شود، متناسب با جهت وزش باد در انتهای ماه دوم، جهت جریان‌های سطحی در لایه سطحی در محل قرارگیری قفس‌ها عمدتاً جنوبی و جنوب غربی هستند. این در حالی است که جهت جریان‌های سطحی در بخش‌های شمالی منطقه مورد مطالعه عمدتاً در راستای جنوب شرقی شکل گرفته‌اند. این اختلاف در راستای جریان‌های ناشی از باد در بخش‌های کم‌عمق منطقه مورد مطالعه و قسمت‌های عمیق این حوضه می‌تواند به دلیل تأثیر بستر و نقش اصطکاک در توازن بین نیروهای موثر بر توده آب باشد. علاوه بر این، تغییرات میدان باد در بخش‌های مختلف نیز از دیگر عوامل این اختلاف است. چنانچه در شکل نشان داده شده است، در انتهای ماه دوم، سرعت جریانات ناشی از باد در نزدیکی محل چشمه آلودگی فسفات حدود  $2/0$  سانتی‌متر بر ثانیه است. پیش‌بینی مدل در انتهای ماه چهارم نشان‌دهنده شکل‌گیری جریان‌های سطحی شرقی و جنوب شرقی است. سرعت جریان در انتهای این ماه نیز حدود  $2/6$  سانتی‌متر بر ثانیه محاسبه شده است (شکل ۲- ب). در انتهای ماه ششم یعنی در اواخر فروردین  $1398$  میدان جریان در بخش‌های مختلف محیط متفاوت است. این جریانات در بخش‌های عمیق و در قسمت شمالی محیط مورد مطالعه در راستای جنوب غربی شکل گرفته‌اند و سرعتی در حدود  $1/0$  سانتی‌متر بر ثانیه دارند. این در حالی است که در محل قرارگیری قفس‌های پرورش ماهی، جریان‌های سطحی عمدتاً در راستای شمال غربی به وجود آمده‌اند و سرعت آنها تقریباً  $2/0$  سانتی‌متر بر ثانیه است (شکل ۲- ج). تفاوت در راستای جریانات در انتهای ماه هشتم نیز مشهود است. در این زمان، جریان‌های قوی‌تر با سرعتی برابر  $4/0$  سانتی‌متر بر ثانیه در راستای شمال شرقی شبه‌سازی شده‌اند. این در حالی است که جهت جریان‌ها در مناطق کم‌عمق ساحلی عمدتاً شرقی هستند و سرعت به مراتب کمتری حدود  $1$  سانتی‌متر بر ثانیه دارند. در بیشتر مناطق عمیق جریان‌ها با سرعتی برابر  $3$  سانتی‌متر بر ثانیه، در راستای جنوب شرقی شکل گرفته‌اند (شکل ۲- د). شکل‌های مربوط به جریانات سطحی نمایش داده شده در شکل ۲، به‌عنوان نمونه ارائه شده‌اند. از دیدگاه فیزیکی و دینامیکی و براساس رابطه ۱۲، هر تغییری در سرعت و جهت جریانات ناشی از باد (به‌ویژه در محل یا مناطق مجاور چشمه آلودگی) تأثیر مستقیم بر جهت و میزان انتشار فسفات در راستای افقی و قائم خواهد داشت. عدم تقارن در میزان انتشار فسفات پس از گذشت چند ماهه، دال بر این واقعیت است و در راستاهای هم‌جهت با جریانات ناشی از باد میزان انتشار نیز بیشتر رخ می‌دهد (شکل ۳).

از شروع زمان شبه‌سازی و آغاز انتشار فسفات از محل استقرار قفس‌های پرورش ماهی، جریانات سطحی نقش عمده‌ای در انتشار فسفات ایفا می‌کنند. با گذشت زمان و با ایجاد جریانات قائم که بر اثر واگرایی و همگرایی جریانات افقی شکل می‌گیرند، انتشار فسفات



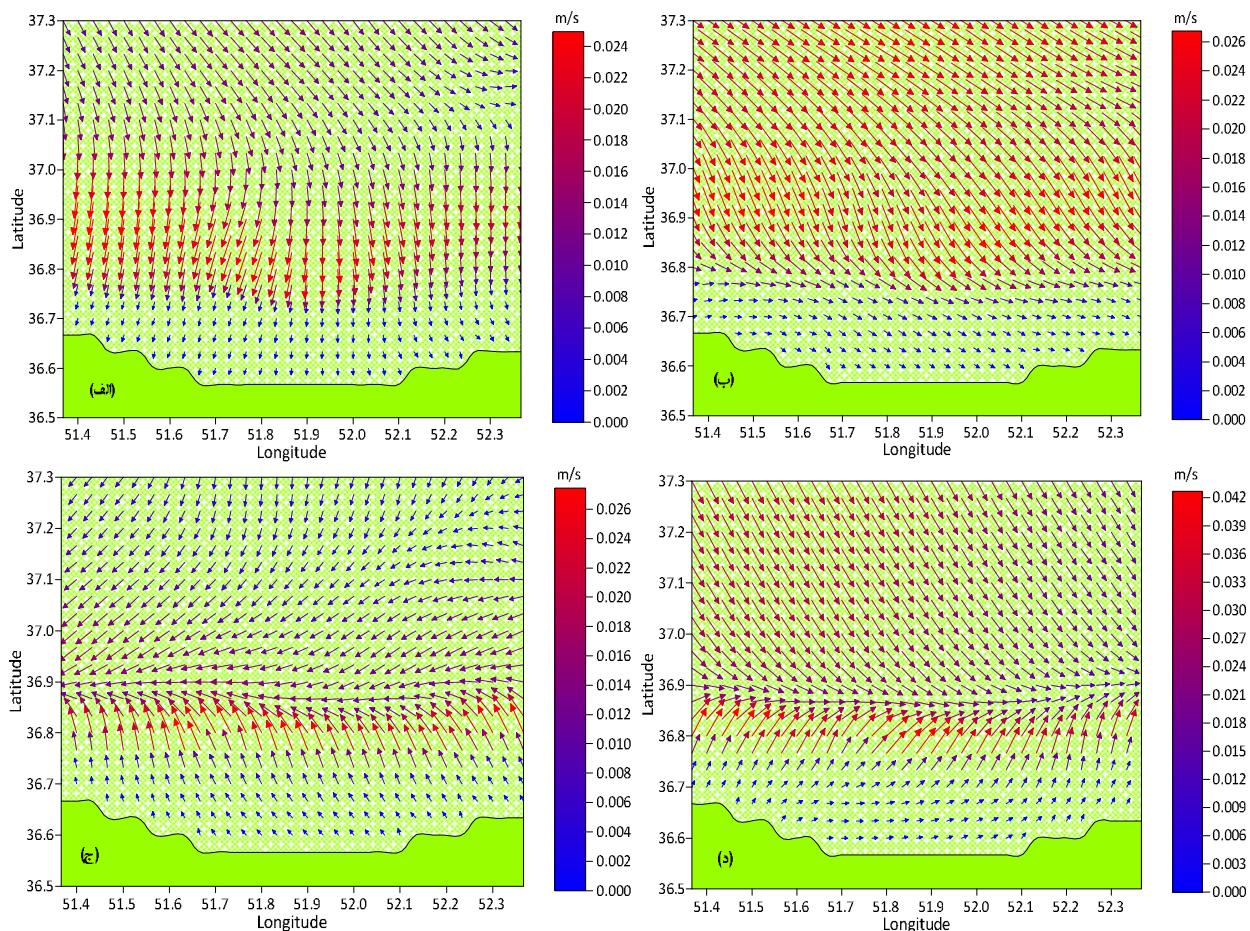
فواصل افقی از محل استقرار قفس‌ها نیز تقلیل یابد. جزئیات بیشتر در رابطه با تغییرات سالانه و ادامه فرآیند انتشار فسفات و دیگر آلاینده‌ها مستلزم انجام تحقیقات تکمیلی، اندازه‌گیری و پایش محیطی مداوم است.

در مجموع، آنچه از نتایج مطالعه حاضر استنباط می‌شود، با شروع انتشار فسفات یا هر آلاینده دیگر، روند انتشار افزایشی و متاثر از گرادیان افقی و قائم غلظت آلاینده است. با گذشت زمان و افزایش غلظت آلاینده در فواصل ۵ تا ۱۰ کیلومتری در راستای افقی و ۳۰۰ تا ۴۰۰ متری در راستای قائم، انتظار می‌رود نرخ انتشار با سرعت کمتری اتفاق بیفتد. بررسی تغییرات نرخ افزایش انتشار آلاینده، خود مستلزم انجام مطالعات تکمیلی با اجرای مدل برای دوره‌های طولانی‌تر و انجام پایش‌های میدانی به فواصل مکانی منظم و در دوره‌های زمانی مشخص برای کالیبراسیون ضرایب انتشار است.

این مطالعه در راستای طراحی پایه یک مدل هیدرودینامیکی کارآمد با توانایی پیش‌بینی انتشار آلاینده‌های منتشرشده در محیط‌های دریایی انجام شده است. برای آزمایش عملکرد مدل، به مطالعه موردی بر روی انتشار فسفات منتشرشده از قفس‌های پرورش ماهی پرداخته شده است.

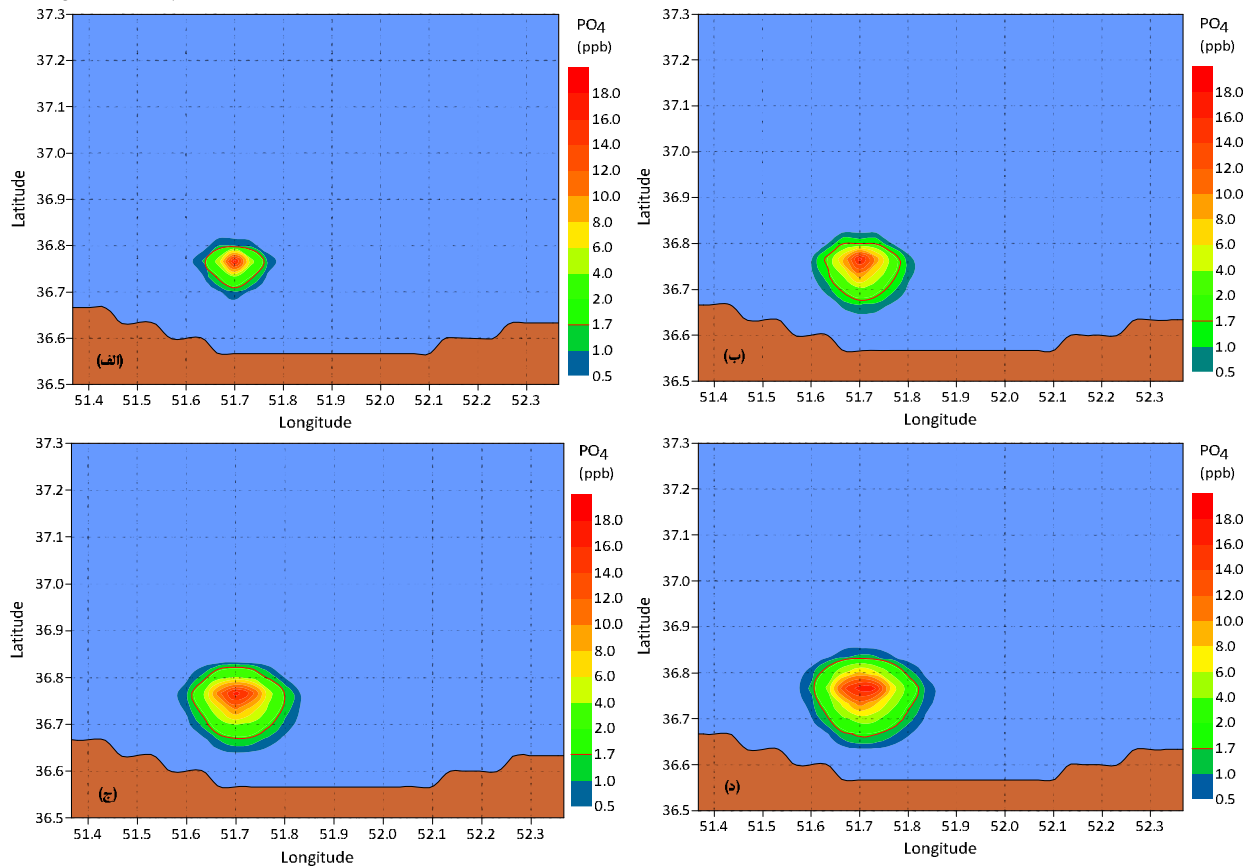
نیز رسیده است. در این زمان، خط هم‌مقدار ۱۰ درصدی به اعماق بیش از ۱۵۰ متر رسیده و در انتهای ماه هشتم به عمق ۴۰۰ متری گسترش پیدا کرده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، انتشار فسفات در راستای قائم در عرض‌های بالاتر که عمق محیط افزایش شدیدی دارد، با محدودیت کمتری انجام شده است. پس از نزدیک شدن خط هم‌مقدار ۱/۷ ppb به بستر دریا در عرض جغرافیایی ۳۶/۸ درجه شمالی، در ادامه انتشار فسفات در راستای قائم تداوم یافته و در انتهای ماه هشتم، خط هم‌مقدار ۴ ppb نیز به کف دریا رسیده است. اگرچه سرعت قائم حداقل دو مرتبه کمتر از سرعت افقی است، به دلیل جابه‌جایی حجم بالایی از آب در راستای قائم به همراه سرعت قائم ایجادشده، انتشار تکانه، فسفات و دیگر فراسنج‌ها در راستای قائم قابل توجه است.

پس از جمع‌آوری ماهی‌های پرورش داده‌شده در قفس، چنانچه به مدت ۲ تا ۳ ماه فرآیند پرورش ماهی، همچنین رهاسازی فسفات و دیگر مواد شیمیایی نظیر نیترات، نیتريت، کربن آلی، نیتروژن آلی و غیره از قفس‌ها متوقف شود انتظار می‌رود با حذف جمله چشمه، کاهش غلظت فسفات و استهلاک آن در توده‌های آبی مجاور رخ دهد و از تجمع بیشتر فسفات در لایه‌های پایین‌تر همچنین در

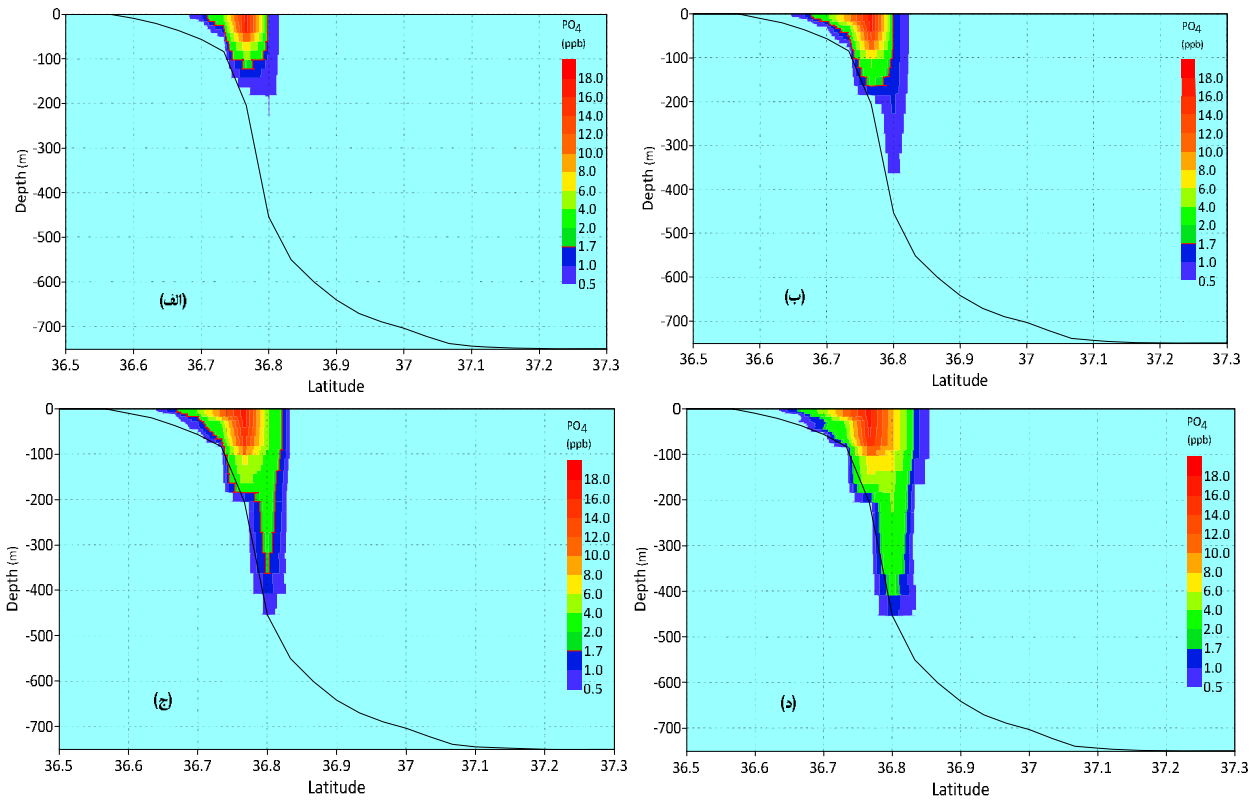


شکل ۲) میدان جریان لایه سطحی در انتهای ماه دوم (الف)، ماه چهارم (ب)، ماه ششم (ج) و از شروع دوره شبیه‌سازی در بخش جنوبی دریای خزر، منطقه دریایی سیسنگان





شکل ۳ میزان انتشار فسفات در راستای افقی در لایه سطحی در انتهای ماه دوم (الف)، چهارم (ب)، ششم (ج) و هشتم (د) از شروع دوره شبیه‌سازی؛ خط هم‌مقدار قرمز، نشانگر غلظت فسفات به مقدار ۱۰٪ غلظت چشمه آلودگی است.



شکل ۴ انتشار قائم فسفات در راستای قائم در برش شمالی- جنوبی در انتهای ماه دوم (الف)، ماه چهارم (ب)، ماه ششم (ج) و ماه هشتم (د) از شروع دوره شبیه‌سازی؛ خط مشکی نشانگر بستر دریا است.

## بحث

نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ حسین فرجامی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۱۰٪)  
**منابع مالی:** این مطالعه بر پایه حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس در قالب حمایت از پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد انجام شده است.

## منابع

- 1- El-Gayar OF, Leung P. ADDSS: A tool for regional aquaculture development. *Aquac Eng.* 2000;23(1-3):181-202.
- 2- Ayer NW, Tyedmers PH. Assessing alternative aquaculture technologies: Life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. *J Clean Prod.* 2009;17(3):362-73.
- 3- Barton JR, Fløysand A. The political ecology of Chilean salmon aquaculture, 1982-2010: A trajectory from economic development to global sustainability. *Glob Environ Chang.* 2010;20(4):739-52.
- 4- Beveridge MC. *Cage aquaculture*. 3<sup>rd</sup> Edition. Hoboken: Wiley; 2004.
- 5- Ali A, Thiem Ø, Berntsen J. Numerical modelling of organic waste dispersion from fjord located fish farms. *Ocean Dyn.* 2011;61(7):977-89.
- 6- Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Cage aquaculture: Regional reviews and global overview*. Halwart M, Soto D, Arthur JR, editors. Rome: FAO; 2007.
- 7- Daputo G, Massa F, Costa S, Cimoli L, Olivari E, Chiantore M, et al. A spatial multi-criteria evaluation for site selection of offshore marine fish farm in the Ligurian Sea, Italy. *Ocean Coast Manag.* 2015;116:64-77.
- 8- Beveridge MC. *Cage aquaculture*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2008.
- 9- Hall PO, Holby O, Kollberg S, Samuelsson MO. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. IV. Nitrogen. *Mar Ecol Prog Ser.* 1992;89(1):81-91.
- 10- Holby O, Hall PO. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus. *Mar Ecol Prog Ser.* 1991;70(3):263-72.
- 11- Wu RS. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Mar Pollut Bull.* 1995;31(4-12):159-66.
- 12- Penczak T, Galicka W, Molinski M, Kusto E, Zalewski M. The enrichment of a mesotrophic lake by carbon, phosphorus and nitrogen from the cage aquaculture of rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *J Appl Ecol.* 1982;19(2):371-93.
- 13- Axler R, Owen C, Ameel J, Ruzycycki E, Henneck J. Water quality issues associated with aquaculture: A case study in Minnesota Mine pit lakes. *Lake Reserv Manag.* 1994;9(2):53-63.
- 14- Wang HS, Chen ZJ, Cheng Z, Du J, Man YB, Leung HM, et al. Aquaculture-derived enrichment of hexachlorocyclohexanes (HCHs) and dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) in coastal sediments of Hong Kong and adjacent mainland China. *Sci Total Environ.* 2014;466-467:214-20.
- 15- Price C, Black KD, Hargrave BT, Morris Jr JA. Marine cage culture and the environment: Effects on water quality and primary production. *Aquac Environ Interact.* 2015;6(2):151-74.
- 16- Refa AS. Main frame study for sea cage culture development in Iran [Report]. Unknown Publisher city:

در مطالعه حاضر، یک مدل هیدرودینامیکی سه بعدی با قابلیت بررسی انتشار آلاینده‌های منتشرشده در محیط‌های دریایی، مبتنی بر معادلات مقدم در دستگاه مختصات کروی زمین با آرایه قائم سیگما طراحی شد. این مدل به منظور بررسی انتشار فسفات منتشرشده از قفس‌های پرورش ماهی در منطقه دریایی سیسنگان واقع در بخش جنوبی دریای خزر مورد استفاده قرار گرفت. در گام نخست، مدل با تفکیک ۲ دقیقه‌ای در راستای شرقی‌سوی و شمال‌سوی برای شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از باد در کل حوضه دریای خزر به مدت ۸ ماه از ابتدای آبان‌ماه ۱۳۹۷ تا اواخر خرداد ۱۳۹۸ اجرا شد. در گام بعدی، جریان‌های ناشی از باد و انتشار فسفات از یک منبع آلاینده واقع در محل استقرار قفس‌های پرورش ماهی در منطقه‌ای محدودتر در محدوده دریایی سیسنگان شبیه‌سازی شد. برای اطلاعات مرز باز در این شبیه‌سازی از خروجی‌های ساعتی شبیه‌سازی نخست استفاده شد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که الگوی انتشار فسفات متأثر از الگوی جریان‌های ناشی از باد است و در راستای شرقی- غربی و جنوبی گسترش بیشتری داشته است. همچنین با گذشت ۸ ماه از شروع انتشار فسفات از چشمه آلودگی واقع در محل استقرار قفس‌ها، در راستاهای شرقی، غربی، جنوبی و شمالی به ترتیب در فواصل ۱۰/۹، ۸/۵، ۹/۵ و ۵/۷ کیلومتری از منبع آلاینده، غلظت فسفات به ۱۰٪ مقدار منبع می‌رسد. علاوه بر آن در راستای قائم نیز انتشار فسفات تا اعماق ۴۰۰ متری گسترش می‌یابد. واگرایی و همگرایی جریان‌های افقی و شکل‌گیری جریان‌های قائم، همچنین تلاطم در لایه سطحی نیز در میزان انتشار فسفات در راستای قائم موثر هستند.

## نتیجه‌گیری

مدل عددی ارایه‌شده در این مطالعه توانایی قابل توجهی برای شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های منتشرشده در محیط‌های دریایی دارد و بررسی‌های دقیق‌تر مربوط به انتشار آلاینده‌های مختلف از جمله فسفات، نیترات، نیتريت، نیتروژن آلی و کربن آلی و غیره نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر، پایش مداوم غلظت آلاینده‌ها در فواصل زمانی و مکانی منظم، به‌ویژه کالیبراسیون دقیق‌تر ضرایب انتشار آلاینده‌ها در ساختار مدل است.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی، اعضای هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس جناب آقای دکتر مهدی غلامعلی‌فرد و سرکار خانم دکتر سمیه نه‌اوندیان که اطلاعات میدانی اندازه‌گیری‌شده را برای استفاده در این مطالعه در اختیار گذاشتند قدردانی می‌کنند.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**سهم نویسندگان:** اکبر رشیدی ابراهیم حساری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ نوید بذگر (نویسنده دوم)،

20- Rodionov SN. Association between winter precipitation and water level fluctuations in the Great Lakes and atmospheric circulation patterns. *J Clim.* 1994;7(11):1693-706.

21- Boudreau B. Digenetic models and their implementation. 1<sup>st</sup> Edition. Berlin: Springer; 1997.

22- Saleh A, Hamzhepour A, Mehdinia A, Bastami KD, Mazaheri S. Hydrochemistry and nutrient distribution in southern deep-water basin of the Caspian Sea. *Mar Pollut Bull.* 2018;127:406-11.

Unknown Publisher; 2002. Report No.: Unknown.

17- Haseeb M, Bibi A, Tan S, Iftikhar A. Waste distribution modelling based on geographical information systems of fish farm Cages of Bahawalnagar in Punjab province of Pakistan. *Int J Fish Aquac.* 2012;4(5):92-8.

18- Mofidi J, Rashidi Ebrahim Hesari A. Numerical simulation of the wind-induced current in the Caspian Sea. *Int J Coast Offshore Eng.* 2018;2(1):67-77.

19- Apel JR. Principles of ocean physics. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.