

## شبیه‌سازی عددی تغییرات فصلی پلانکتون‌ها و مواد مغذی در شمال دریای عمان با استفاده از مدل جفت‌شده ROMS-NPZD

هاله ثمنی<sup>۱</sup>، عباسعلی اکبری بیدختی<sup>۲\*</sup>، مجتبی عظام<sup>۳</sup> و تورج ولی‌نسب<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استاد موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶)

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از مدل سه‌بعدی ROMS، تغییرات فصلی پلانکتون‌ها در شمال دریای عمان بررسی شده است. مدل با استفاده از شرایط اولیه از داده‌های WOA5 با تفکیک‌پذیری افقی ۰/۲۵ درجه و گام زمانی ۳۰۰ ثانیه به مدت یک سال انتخاب شده است. داده‌های مختصاتی با درون‌یابی در راستای قائم دما و شوری، روی تراز سیگما (سی لایه) محاسبه شد. در این بررسی به علت سازگاری بیشتر زیرمدل NPZD نسبت به سایر زیرمدل‌ها، مدل ROMS با مدل NPZD جفت شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد: (الف) تغییر دما از عوامل اصلی در فراوانی میزان فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها است؛ (ب) پیچک‌های ساعتگرد و پادساعتگرد که بیانگر به ترتیب پدیده فرو و فراچاهی در دریای عمان و تنگه هرمز هستند، باعث انتقال کلروفیل از مناطق جنوبی به شمالی می‌شوند؛ (ج) مقدار کلروفیل در طول زمستان در مقایسه با تابستان بیشتر است که علت این مسئله می‌تواند تغییرات ترموکلاین فصلی باشد. علی‌رغم در دسترس بودن مواد مغذی، لایه ترموکلاین مانع شکوفایی می‌شود؛ (د) بررسی تغییرات فیتوپلانکتون‌ها در یک دوره یک ساله، بیشترین مقدار آنها را اواخر اسفند و اوایل بهار نشان می‌دهد. فروردین ماه به علت افزایش جمعیت فیتوپلانکتون‌ها، اوج شکوفایی زئوپلانکتون‌ها است. همچنین تمرکز پلانکتون‌ها بیشتر به مواد مغذی وابسته است، به طوری که در دسترس بودن مواد مغذی اغلب عاملی کلیدی در رشد و سوخت‌وساز آنها است؛ (ه) مقدار کلروفیل در زمستان همبستگی مثبت ( $r=0/965$ ) با دمای سطح آب نشان می‌دهد، در حالی که در تابستان، همبستگی منفی است ( $r=-0/549$ ) و غلظت کلروفیل در زمستان و تابستان اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهد ( $p<0/05$  برای). در زمستان و تابستان، مقدار کلروفیل با نترات همبستگی مثبت نشان می‌دهد که به ترتیب مقدار آن  $r=0/794$  و  $r=0/268$  است و اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد ( $p<0/05$ )؛ (و) در بیشتر موارد، نتایج ماهواره‌ای دما و کلروفیل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مدل‌سازی عددی سازگاری مناسبی داشته است.

واژه‌های کلیدی: دریای عمان، شبیه‌سازی عددی، ROMS-NPZD، پلانکتون، مواد مغذی

## ۱ مقدمه

دریای عمان که بین ۲۲ تا ۲۶ درجه عرض شمالی و ۵۷ تا ۶۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی در نیمکره شمالی قرار دارد، آب اقیانوس هند و دریای عرب را از سمت شمال غربی و از راه تنگه هرمز به خلیج فارس متصل می‌کند. قسمت جنوب شرقی دریای عمان به اقیانوس هند و دریای عرب متصل است. آب‌های کم عمق آن در قسمت ساحلی و در مجاورت تنگه هرمز قرار دارند. عمق دریای عمان در جنوب شرقی از ۳۴۰۰ متر تجاوز می‌کند (دریانبرد، ۲۰۰۶). بادهای در دریای عمان اغلب در راستای محور شمال غربی- جنوب شرقی می‌وزند که بادهای شمال غربی رایج‌تر هستند. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه، این منطقه تحت تأثیر جریان‌های جوی مانسون (Monsoon) و در نتیجه، باران‌های موسمی اقیانوس هند است. گردش عمده در دریای عمان ناشی از وجود دو پیچک (Eddy) ساعتگرد (cyclonic) و پادساعتگرد (anticyclonic) است. گردش ساعتگرد در غرب بر آب‌های سطحی در سواحل کشور عمان و تنگه هرمز تأثیر می‌گذارد. گردش پادساعتگرد در ناحیه مرکزی دریای عمان وجود دارد که عامل بروز پدیده فراچاهی است (رینولدز، ۱۹۹۳). چگال‌ترین آب در زمستان در انتهای شمالی خلیج با شوری ۴۱ psu و بیشینه دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرد که این آب‌ها همچنان که به سمت دریای عمان حرکت می‌کنند، به شکل افقی و قائم آمیخته می‌شوند (قاضی و همکاران، ۱۳۹۴). در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای درباره تأثیر پدیده‌های هیدرودینامیکی بر حرکت پلانکتون‌ها انجام شده است. فیتوپلانکتون‌ها موجودات تک‌سلولی هستند که با استفاده از کلروفیل، انرژی خورشید را جذب و تبدیل به انرژی شیمیایی می‌کنند. به عبارت دیگر، با جذب نور، از دی اکسید کربن و آب، هیدرات کربن سنتز می‌کنند (کیمبرلی و بنان، ۲۰۱۵).

افزایش ناگهانی جلبک‌ها که سریع رشد می‌کنند و رنگ آب دریا را به قرمز، قهوه‌ای و حتی سبز تغییر می‌دهند، کشتند قرمز (red tide) نامیده می‌شود. این پدیده در آب‌های خلیج فارس و دریای عمان بارها مشاهده و گزارش شده است. اگر این رویداد موقت و ناپایدار باشد، چندان نگران‌کننده نیست، ولی اگر به صورت پایدار درآید، ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری بر بوم‌سازگان آبی و آبریان وارد کند. شکوفایی پایدار می‌تواند سبب کمبود اکسیژن در منطقه شود و در نتیجه، خفگی آبریان را در پی داشته باشد. موقعی که شکوفایی به حالت لزج و چسبنده درمی‌آید، بیشترین مرگ‌ومیر موجودات دریایی نیز اتفاق می‌افتد (اندرسون، ۱۹۹۴). فیتوپلانکتون‌های متعددی در آب‌های خلیج فارس و دریای عمان وجود دارند که چرخه غذایی اقیانوس را تشکیل می‌دهند (خاتمی و همکاران، ۱۳۹۱). تعداد معدودی از فیتوپلانکتون‌ها سمی هستند؛ برای مثال جلبک تک‌سلولی Noctiluca گونه‌ای از دینوفلاژله (Dinophyceae) دریایی است که شکوفایی‌های گسترده تولید می‌کند و می‌تواند باعث مرگ آبریان همچون ماهی‌ها و بی‌مهرگان دریایی شود (روحانی و همکاران، ۱۳۹۶). این جلبک‌ها اسیدهایی را ترشح می‌کنند که می‌توانند با تحریک دستگاه عصبی در انسان سبب مسمومیت شوند. مقدار کم این جلبک در انسان باعث سردرد و فراموشی موقتی (short-term memory loss) و مقدار زیاد آن باعث مرگ می‌شود (یان و ژو، ۲۰۰۴). علی‌رغم کمبود مواد غذایی و نور یا شکار زئوپلانکتون‌ها شدن، جمعیت می‌تواند به سرعت افزایش یابد. در برخی از حالات، یک میلی‌لیتر از آب دریا می‌تواند حاوی ده‌ها یا هزاران هزار سلول جلبکی باشد. این افزایش زمانی رخ می‌دهد که شرایط از نظر نور، دما و مواد مغذی جهت انجام فتوسنتز، مناسب و تعداد پلانکتون-های جانوری و آبریان تغذیه‌کننده نیز کم باشد. باد یا جریان‌های دریایی نیز در میزان پراکندگی پلانکتون‌ها

مدل سه‌بعدی ROMS (Regional Ocean Modeling System) جفت‌شده با مدل NPZD (Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus) در منطقه شمال غربی اقیانوس آرام بررسی شده است. در اثر پدیده فراچاهی، آب‌های ساحلی حرکت می‌کنند و آب‌های سرد و غنی از مواد مغذی از عمق جایگزین می‌شوند. رشد فیتوپلانکتون‌ها بیشتر به دما، تغییرات مواد مغذی و نور وابسته است که اینها خود به هیدرودینامیک منطقه و تغییرات فصلی و سالیانه وابسته هستند. این مطالعه نشان داد پدیده فراچاهی نقش مهمی در افزایش تراکم فیتوپلانکتون‌ها و کلروفیل در اواخر تابستان و اوایل پاییز دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۶).

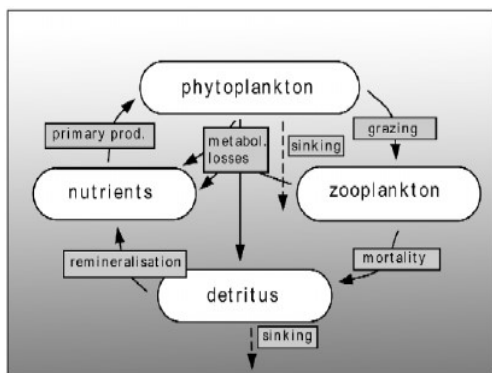
## ۲ مواد و روش‌ها

### مدل اقیانوسی ROMS/NPZD

مدل ROMS مدلی سه‌بعدی سطح آزاد است که در آن از معادلات غیرپایای رینولدز، ناوراستوکس و معادلات انتقال اسکالر با فرض تقریب هیدرواستاتیک و بوسینسک استفاده شده است. توانایی‌های این مدل شامل دقت زیاد، قابلیت جفت شدن با مدل‌های دیگر، شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی، بیوژئوشیمیایی، بررسی رسوب و پوشش یخ است. مدل ROMS را هایدوگل و همکاران (۱۹۹۹)، مارچسلو و همکاران (۲۰۰۳) و اسپچتکین و مک‌ویلیامز (۲۰۰۳) توسعه داده‌اند. ادواردز و همکاران (۲۰۰۰) و بچلدر و همکاران (۲۰۰۲) مدل ساده بوم‌شناسی NPZ (نوترینت، فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون) را بررسی کردند. اسپیتز و همکاران (۲۰۰۳) نیز به بررسی تفاوت رفتارهای زیست‌شناختی را در سه مدل NPZ، NPZD و NNPZD پرداختند. توصیف کامل یک سامانه دریایی با شناخت پدیده‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی امکان‌پذیر است. مؤلفه‌های فیزیکی شامل جریان، اختلاط، نفوذ نور، لایه‌بندی و یخ است. در مدل‌سازی، علاوه بر مؤلفه‌های

مؤثر هستند (عباس‌پور و زهدی، ۲۰۱۸). بیشترین رشد فیتوپلانکتون‌ها در اعماق جایی است که غنی از مواد مغذی (مانند نیتروژن، آهن و فسفر) باشد. پدیده کشند قرمز در خلیج فارس و دریای عمان به دلیل داشتن منابع غنی آبریزان و گوناگونی زیستگاه‌های مهم، ورود فاضلاب‌ها و پساب‌های انسانی، فعالیت‌های صنعتی در مناطق ساحلی و سرریز شدن پساب‌هایی که باعث افزایش نیترات، فسفات و سایر مواد مغذی به محدوده می‌شود، یکی از معضلات زیست‌محیطی مهم است (اسمیث و همکاران، ۱۹۹۸). مدل‌های عددی متعددی برای شبیه‌سازی میزان آلودگی که مسبب غنی شدن منابع آبی به وسیله مواد آلی می‌باشند (eutrophic) وجود دارد. در این پدیده، به دلیل وجود ترکیبات حاوی نیتروژن و فسفر، بسیاری از گیاهان آبی سریع‌تر رشد می‌کنند. این مسئله باعث اختلال در تعادل ریزموجودات و کمبود اکسیژن آب می‌شود. تراکم فسفر در وضعیت هایپرتروفیک ( $20 \mu\text{g/l}$ )، در وضعیت مزوتروفیک ( $20-10 \mu\text{g/l}$ )، و در وضعیت اولیگوتروفیک ( $10 \mu\text{g/l}$ ) کمتر از  $10 \mu\text{g/l}$  گزارش شده است (گیلبرت، ۲۰۰۷).

طولانی‌ترین کشند قرمز که تاکنون اتفاق افتاده است، مربوط به وقوع شکوفایی از ابتدای پاییز ۱۳۸۷ تا بهار ۱۳۸۸ در شمال تنگه هرمز است که حدود ده ماه طول کشیده است. با تفسیر تصاویر ماهواره‌ای به‌نظر می‌رسد پدیده کشند قرمز از سواحل کشور عمان در دریای عرب شروع و پس از حرکت به جنوب دریای عمان، تحت تأثیر پیچک‌های میان‌مقیاس، به شمال دریای عمان و سواحل شمالی تنگه هرمز کشیده شده است. مقدار کلروفیل در این کشند حدود  $10 \text{mg/m}^3$  بوده است که در مقایسه با مقدار متوسط سال‌های گذشته  $3-4 \text{mg/m}^3$  افزایش چشمگیری داشته است (حمزه‌ای و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۱. چرخه NPZD (پاول و همکاران، ۲۰۱۴).

از آنجاییکه در اثر فعالیت رو به افزایش ریزموجودات دریایی، نیتروژن موجود در دریاها و اقیانوس‌ها به گاز نیتروژن تبدیل و وارد جو می‌شود، چرخه نیتروژن در اقیانوس از اهمیت زیادی برخوردار است. نیتروژن در آب معمولاً به صورت  $N_2$  و  $NO_3^-$  یافت می‌شود. در فرایند نیتریفیکاسیون، آمونیوم به نیتريت و سپس به نترات تبدیل می‌شود. نترات، نیتريت و آمونیاک موجود در آب دریا از مواد غذایی مورد نیاز پلانکتون‌ها هستند که باعث کاهش تراکم نیتروژن در سطح دریا نسبت به عمق آن می‌شوند (ناقوی، ۱۹۹۴). تحقیقات نشان داده است در لایه‌ای با کمترین اکسیژن (Oxygen Minimum Zones, OMZ)، فراوانی گونه‌هایی از فیتوپلانکتون‌ها افزایش و مقدار مواد مغذی کاهش می‌یابد. جنوب شرقی دریای عرب از مناطق OMZ در اقیانوس‌ها است (بانس و همکاران، ۲۰۱۴).

### ۳ مبانی نظری و محاسبات

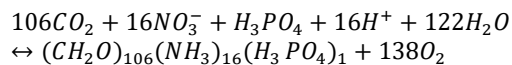
#### ۳-۱ معادلات حاکم

پاول و همکاران (۲۰۰۶) معادلات بقا در مدل ROMS-NPZD را با چهار متغیر نیتريت، فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون و ذرات پوده بررسی کردند. در این مدل، سمت چپ

دینامیکی، به حل معادلات برای متغیرهای زیست‌شناختی و شیمیایی نیاز است. در اینجا نیز مشابه آنچه برای معادلات دما و شوری نوشته می‌شود، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی حاکم بر این متغیرها و تبدیل معادلات به شکل تفاضل محدود و سپس حل آنها به روش عددی مورد نیاز است. امروزه مدل‌های هیدرودینامیکی و بوم‌سازگانی متعددی وجود دارد که انتخاب مدل با توجه به منطقه مورد مطالعه و توانایی‌های مختلف مدل‌ها صورت می‌گیرد. از جمله این مدل‌ها، مدل‌های HYCOM، ROMS، POM، FVCOM، COHERENSE، می‌توان نام برد. استفاده از این مدل‌ها نیازمند تعریف شبکه مدل، شرایط اولیه، شرایط مرزهای جانبی، شارهای سطحی، عوامل واداشت و ... است. در این مقاله با استفاده از مدل جفت‌شده سه‌بعدی فیزیکی-زیستی (ROMS/NPZD) پراکندگی فصلی فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون شمال دریای عمان مدل‌سازی شده است. مدل NPZD مدلی بر پایه چرخه نیتروژن است که پژوهشگران متعددی آن را جهت مدل‌سازی فرایندهای فیزیکی، بیوژئوشیمیایی و بوم‌شناسی بررسی کرده‌اند. مدل NPZD شامل چهار معادله دیفرانسیلی است که تعادل دینامیکی بین متغیرهای عناصر غذایی مغذی (N)، فیتوپلانکتون (P)، زئوپلانکتون (Z) و ذرات پوده یا دیتريت (D) را در ستون آب شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل در اثر دینیتریفیکاسیون، مواد آلی ته‌نشین شده به  $N_2$  و  $NH_4$  تبدیل و سپس در اثر نیتریفیکاسیون (nitrification) به  $NO_3$  تبدیل می‌شوند؛ زئوپلانکتون‌ها، فیتوپلانکتون‌ها را می‌خورند و بقایای فیتوپلانکتون‌ها ته‌نشین می‌شود. در عمل نیتریفیکاسیون، آمونیوم به نترات تبدیل و در دینیتریفیکاسیون، نتراتی که ریزموجودات جذب کرده‌اند، به نیتريت و سپس به آمونیوم و در نهایت، به گاز نیتروژن تبدیل می‌شود (فنل و همکاران، ۲۰۰۶).

۲۰۰۱). ضرایب استفاده‌شده در این معادلات در جدول ۱ آمده است.

فتوستتر فیتوپلانکتون‌ها در لایه سطحی با جذب کربن و مواد مغذی به تولید مواد مغذی در اقیانوس‌ها منجر می‌شود. گونه‌های مختلف فیتوپلانکتون برای رشد و تکثیر، نسبت‌های مشخصی از مواد مغذی را مصرف می‌کنند. اولین بار معیار استوکیومتری (Stoichiometry) محدودیت مواد مغذی را برای رشد پلانکتون‌ها مطرح شد. نسبت ردفیلد، نسبت ثابت اتمی کربن، نیتروژن و فسفر (C:N:P=۱۰۶:۱۶:۱) است که برای کلیه اقیانوس‌های جهان سازگار است (ردفیلد و همکاران، ۱۹۶۳). برای به‌کارگیری نسبت فوق در تعیین محدودیت مواد مغذی لازم است تراکم این ترکیبات به حد آستانه رسیده باشد. در استوکیومتری شیمیایی، مقدار مواد مصرف‌شده و تولیدشده در واکنش‌های شیمیایی در نظر گرفته می‌شود. واکنش شیمیایی برای فتوستتر به شکل زیر است:



معادلات، آهنگ تغییرات محلی و فرارفت و سمت راست، پارامترهای زیست‌شناختی و اختلاط عمودی است.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \cdot \nabla N = \delta D + \gamma_n GZ - Up + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial N}{\partial z} \right). \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \cdot \nabla P = UP - GZ - \sigma_d P + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \cdot \nabla Z = (1 - \gamma_n)GZ - \zeta_d Z + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial Z}{\partial z} \right). \quad (3)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + u \cdot \nabla D = \sigma_d P + \zeta_d Z - \delta D + w_d \frac{\partial D}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial D}{\partial z} \right). \quad (4)$$

$$GG = R_m (1 - e^{-\lambda P}). \quad (5)$$

$$I_z = I_0 \cdot \exp \left( -K_z Z + K_p \int_0^z P(z') dz' \right). \quad (6)$$

$$U = \frac{V_m N}{K_N + N} \frac{\alpha I}{\sqrt{v_m^2 + \alpha^2 I^2}}. \quad (7)$$

در این معادلات نرخ رشد فیتوپلانکتون‌ها به مواد مغذی محلول و عمق لایه اختلاط وابسته است و بر اساس مقدار نور در دسترس برای فتوستتر محاسبه می‌شود. تراکم زئوپلانکتون‌ها با افزایش عمق در لایه اختلاط و رقیق شدن محیط، کاهش و با کاهش عمق در لایه اختلاط، افزایش می‌یابد. پراکندگی مواد مغذی با افزایش عمق از الگوی تغییرات فصلی مشخصی پیروی می‌کند (فنل و همکاران،

جدول ۱. مقادیر نمونه‌ای پارامترهای مدل ROMS/NPZD (پاول و همکاران، ۲۰۰۶).

پارامتر	شناسه	واحد	مقدار اولیه
حداکثر نرخ رشد فیتوپلانکتونی	$\sigma_d$	$d^{-1}$	0/1
ضریب تاثیر کاهش نور	$k_z$	$m^{-1}$	0/067
شیب اولیه منحنی P-I (نور-فتوستتر)	$\alpha$	$m^2(W)^{-1}$	0/025
ضریب جذب	$\gamma_n$	-	0/3
نرخ خوردن زئوپلانکتون	$R_m$	$d^{-1}$	0/52
مقدار غلظت نیمه اشباع برای رشد فیتوپلانکتون	$K_p$	$m^2 mmol - N^{-1}$	0/0095
نرخ مرگ و میر زئوپلانکتون	$\zeta_d$	$d^{-1}$	0/145
حداکثر نرخ نیتریفیکاسیون	$V_{max}$	$d^{-1}$	1/5
نرخ معدنی شدن	$\delta$	$d^{-1}$	1/03
آستانه تابش نور	$I_0$	$Wm^{-2}$	158/075
نرخ ته نشست ذرات ریز	$w_d$	$md^{-1}$	0/8
مقدار غلظت نیمه اشباع برای رشد زئوپلانکتون	$K_v$	$Mmol-Nm^{-2}$	1/0

### ۲-۳ آماده‌سازی داده‌ها

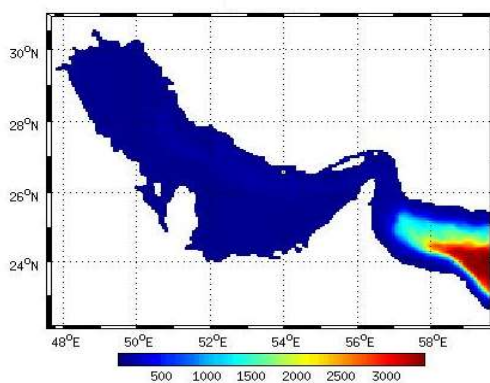
داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی شامل داده‌های توپوگرافی، جوی و اقلیمی است که ابتدا به اختصار این داده‌ها توضیح داده می‌شود. سپس مدل ROMS معرفی و پیکربندی مدل و نحوه اجرای آن بررسی و در نهایت، به نتایج اجرای مدل در قالب میانگین ماهانه در فصل‌های مختلف و تحلیل آنها پرداخته می‌شود. ساختار داده‌های ورودی و خروجی در این مدل بر اساس Netcdf است. برای اجرای یک مدل اقیانوسی، به ابعاد شبکه، دقت در عمق‌سنجی، گام زمانی صحیح و رعایت شرط پایداری (CFL)، شرایط مرزی، شرایط اولیه، نیروهای واداشت سطحی و ضرایب ادی ویسکوزیتی (مربوط به دما و شوری) نیاز است. مدل برای شش سال اجرا شد تا به پایداری برسد.

### ۱-۲-۳ منطقه شبیه‌سازی شده

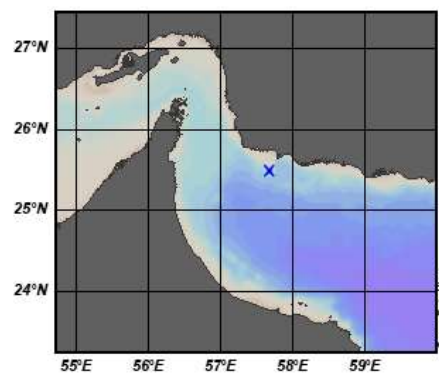
منطقه مورد مطالعه در محدوده عرض جغرافیایی ۲۲ تا ۳۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ تا ۶۰ درجه شرقی در شمال دریای عمان انتخاب شد. به این منظور کل منطقه خلیج فارس و دریای عمان شبیه‌سازی شد. الگوی شبیه‌سازی شده مستقل از جریان خروجی خلیج فارس و جریان ورودی اقیانوس‌ها است.

### ۲-۲-۳ داده‌های توپوگرافی

صحت نتایج مدل به دقت شبکه‌های محاسباتی و ورودی‌های عمق‌سنجی منطقه مورد مطالعه بستگی دارد. داده‌های توپوگرافی به کاررفته در این تحقیق از مجموعه داده‌های جهانی (ETOPO1 Global Digital Elevation Model) شامل داده‌های جهانی توپوگرافی زمین با تفکیک‌پذیری شبکه  $0.25^\circ$  پردازش شده‌اند. این مدل یک مدل جهانی برای اقیانوس و زمین است که از ترکیب محاسبه عمق‌های اندازه‌گیری شده از کشتی‌ها و درون‌یابی داده‌های ماهواره به دست می‌آید. خط ساحلی شبکه با اجرای پردازش‌هایی مانند اصلاح داده‌های عمق به سطح آزاد دریا و هموارسازی ساخته شده است. با توجه به کارآمدی مدل ROMS در تعیین ضخامت لایه‌های عمودی، تصحیح توپوگرافی در راستای عمودی به گونه‌ای است که ضخامت لایه‌ها تا  $0.5$  متر باشد و از کمتر از  $0.5$  متر صرف نظر شده است. با حرکت به سمت عمق این ضخامت افزایش یافته و به  $500$  متر رسیده است. سپس هموارسازی اطلاعات بستر در جهت هموار کردن شیب سلول‌های مجاور انجام شده است تا مدل شکست (blow up) نخورد.



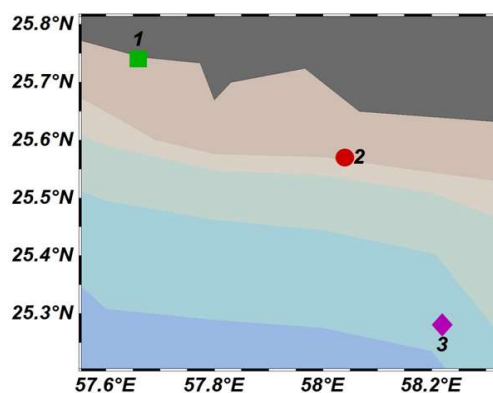
شکل ۳. نمایی از عمق‌سنجی خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از داده‌های جهانی توپوگرافی زمین ETOPO1.



شکل ۴. نقشه منطقه مطالعاتی واقع در شمال دریای عمان.

### ۳-۲-۳ شرایط مرزی

برای تأمین شرط مرزی دریایی در شمال منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی در کل خلیج فارس و دریای عمان اجرا و نتایج در محل مرز باز شرقی و مرز بسته در شمال، جنوب و غرب برای استفاده در مدل شبه‌سازی جریان در شمال دریای عمان استخراج شده است. مدل کلی خلیج فارس و دریای عمان با لحاظ کردن نیروهای باد، دما و شوری اجرا شده است و نتایج شبه‌سازی در محل‌های مشخص‌شده در شکل ۴ که موقعیت مرز باز شبکه مطالعاتی در شمال دریای عمان را نشان می‌دهد، در برش قائمی از سطح تا بستر برای کل دوره مدل‌سازی شده استخراج و به عنوان شرط مرزی به مدل اجراشده در شمال دریای عمان اعمال شده است. برای مرزهای خشکی شمال، جنوب و غرب، شرط نبود لغزش با صفر فرض کردن مؤلفه‌های عمودی جریان اعمال شده است.



شکل ۴. محدوده مورد مطالعه در شمال دریای عمان.

نسبی، فشار سطح دریا و سرعت وزش باد است که بسته به نوع پارامتر، با دقت‌ها و زمان‌های متفاوت در دسترس است. داده‌های اقلیمی به‌کاررفته در این مدل، WOA نسخه ۲۰۰۵ است. WOA مجموعه‌ای از داده‌های طولانی-مدت دما، شوری، اکسیژن، نیترات، سیلیکات و فسفات در دوره‌های سالیانه، فصلی و ماهیانه برای اقیانوس‌های جهان است. برای اعمال شرایط اولیه، میانگین داده‌های اقلیمی با تفکیک‌پذیری شبکه افقی ۰/۲۵ حدود ۴ کیلومتر و تعداد لایه‌های تراز سیگما در بعد قائم سی لایه در نظر گرفته شده است. پس از اجرای مدل با گام زمانی ۳۰۰ ثانیه، خروجی‌های مدل برای یک سال تهیه شد. برای اطلاعات زیست‌شناختی از داده‌های WOA5 و SEAWIFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) استفاده شده است. این داده‌ها شامل نیتريت، کلروفیل، فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون و ... است. به‌تازگی بخش جدیدی برای مدل‌های زیست‌شناختی پیچیده‌تر به برنامه اضافه شده است که از مجموعه داده‌های WOAPISCES (World Ocean Atlas to nutrient data) استفاده می‌کند. داده‌ها شامل آهن، سیلیکات، اکسیژن، فسفات، کربن و آلکانیلیتی است. در این پژوهش، مد باروکلینیک برابر ۶۰۰ ثانیه، مد باروتروپیک برابر ۶۰ ثانیه و شرط CFL=۰/۴۹ است.

### ۳-۲-۵ ورودی رودخانه

در مدل‌های اقیانوسی معمولاً ورودی آب رودخانه‌ها به عناصر سطحی شبکه، مشکلات عددی ایجاد می‌کند. پلوم‌های رودخانه تمایل دارند در سواحل وارد و با شکست امواج و اختلاط جزر و مدی پخش شوند و اختلاط پیدا کنند. در این صورت خطای شوری ایجاد می‌شود که حاصل اختلاط سواحل نزدیک رودخانه‌هاست؛ از این رو در این تحقیق شوری آب رودخانه‌ها در نظر گرفته نشده است.

### ۳-۲-۴ شرایط اولیه

جهت اعمال نیروهای واداشت سطحی، متوسط سرعت و جهت وزش باد ماهانه، از مجموعه داده‌های هواشناسی NCEP (National Climate Prediction Center) استفاده شده است. این داده‌ها شامل پارامترهای مختلف جوئی مانند دما، درصد پوشش ابر، گرمای نهان، رطوبت

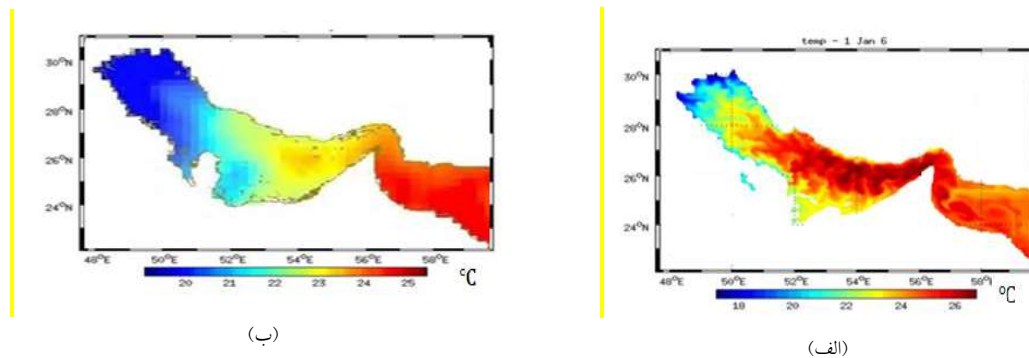
### ۳-۳ صحت‌سنجی مدل ROMS-NPZD

برای صحت‌سنجی مدل، نتایج توزیع دمای سطحی شبیه‌سازی‌شده در ماه اسفند با تصاویر ماهواره‌ای AVHRR سال ۲۰۰۸ (دی ۱۳۸۷) مقایسه شده است. به دلیل وقوع کشند قرمز گسترده در سال ۲۰۰۸ در منطقه خلیج فارس و دریای عمان، بررسی تغییرات هیدرودینامیکی و زیست‌شناختی در این تحقیق با سال ۲۰۰۸ مقایسه شده است. خروجی دما و شوری مدل با دما و شوری حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مقایسه شد. نتایج خروجی مدل با تصاویر ماهواره‌ای همخوانی پذیرفتنی دارد. برای تعیین وضعیت دمای سطحی دریای عمان، دمای نقاط شبکه با در نظر گرفتن طول و عرض جغرافیایی ثبت و خطوط هم‌دما با استفاده از نرم افزار ocean data view رسم شد. با استفاده از دمای مدل و دمای حاصل از ماهواره، برای به دست آوردن رابطه‌ای که دمای آب را با استفاده از دمای حاصل از ماهواره برآورد کند، تحلیل رگرسیون انجام گرفته است. طبق نتایج تحلیل رگرسیون، ضریب همبستگی مثبت نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین متغیرهای استفاده‌شده بوده است؛ در نتیجه، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه دمای سطحی از دقت خوبی برخوردار است.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود حرکت پیچک‌ها به سمت غرب خلیج فارس است و تغییرات دمایی در عمان نسبت

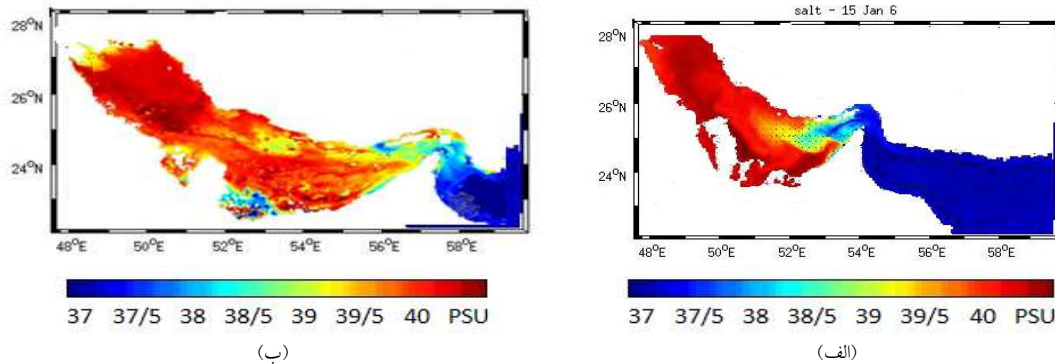
به خلیج فارس کمتر است. تغییرات دمایی در عمان ۲۳ تا ۲۵ و در خلیج فارس ۱۸ تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد است. مقایسه نتایج مدل (شکل ۵-الف) با تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۵-ب) بیانگر این است که الگوی دمای سطحی مدل همخوانی خوبی با تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد. دمای سطحی در سمت غرب خلیج فارس در مدل حدود ۱/۵ تا ۳ درجه اختلاف را نسبت به تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد. علت این اختلاف می‌تواند مربوط به نقش تلاطم سه‌بعدی عامل پخش پیچکی و واداشتهای سطحی جو باشد یا به دلیل تفکیک‌پذیری ضعیف در تصاویر ماهواره‌ای باشد که صحت نتایج ماهواره‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پخش پیچکی در اثر اختلاط تلاطمی دما و شوری در ستون آب ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه اختلاط افقی در منطقه باعث شکل‌گیری لایه‌های ترموهالابینی در منطقه می‌شود، تعیین درست ضرایب پخش پیچکی دما و شوری نقش مهمی در شبیه‌سازی پدیده‌های دریایی دارد.

نوسانات در نیروی تنش باد باعث ایجاد جریان متغیر در تنگه هرمز می‌شود. این تنش باعث ایجاد ناپایداری و تولید پیچک‌های سیکلونی می‌شود. رابطه مستقیمی بین تلاطم و ایجاد پیچک‌ها وجود دارد. داده‌های ماهواره‌ای روش مناسبی جهت اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی و زیست‌شناختی برای مناطق بزرگ اقیانوس است، ولی



شکل ۵. مقایسه دمای سطحی برحسب درجه سانتی‌گراد (الف) حاصل از شبیه‌سازی مدل ماه دی (ب) تصویر ماهواره‌ای حاصل از AVHRR سال ۱۳۸۷.





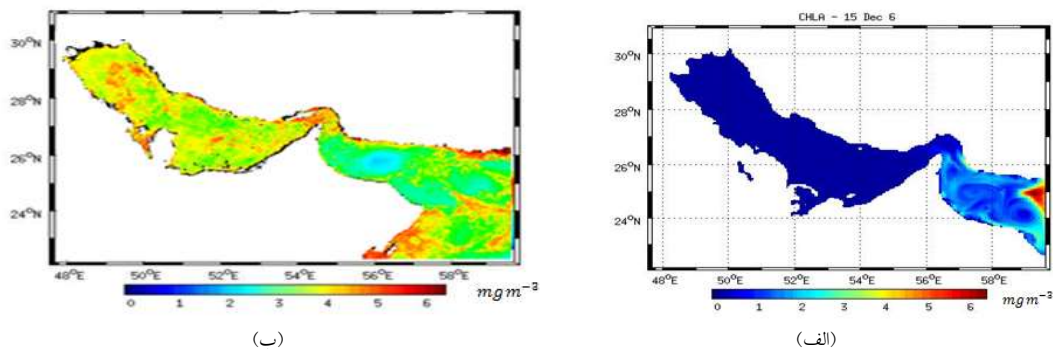
شکل ۶. مقایسه شوری سطحی برحسب (PSU) (الف) حاصل از شبه‌سازی مدل ماه دی (ب) تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از داده‌های WOA5 سال ۱۳۸۷.

از ماهواره مادیس آکوا در سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. تصاویر ماهواره‌ای این دوره زمانی، کشیدگی یک نوار متراکم کلروفیل را در طول سواحل شمالی و محدوده مرکزی تنگه هرمز نشان می‌دهد. با توجه به شرایط اقلیمی و جریان‌های فصلی تنگه هرمز به نظر می‌رسد با کاهش دما، شرایط رشد فیتوپلانکتون‌ها فراهم شده است. در دریای عمان نیز یک پیچک میان‌مقیاس باعث حرکت توده کلروفیل از جنوب به شمال دریای عمان شده است. نتایج مدل‌سازی، تراکم کلروفیل را در اواخر زمستان (اسفند) و اوایل بهار (فروردین) نشان می‌دهد. در اواخر تابستان (شهریور) تراکم کلروفیل به کمترین مقدار خود می‌رسد و این روند کاهشی تا اواخر پاییز (آذر) ادامه دارد. تصاویر ماهواره‌ای تراکم فیتوپلانکتون‌ها را در طول سواحل شمالی و محدوده مرکزی تنگه هرمز نشان می‌دهد. در دریای عمان نیز یک پیچک میان‌مقیاس باعث حرکت فیتوپلانکتون‌ها از جنوب به سمت شمال دریای عمان شده است که در نوار ساحلی مشاهده می‌شود. نتایج مدل‌سازی پراکندگی کلروفیل، که عامل پدیده شکوفایی جلبکی است، با نتایج تصاویر ماهواره‌ای سازگاری به نسبت خوبی را در نواحی عمان و تنگه هرمز نشان می‌دهد.

این گونه داده‌ها محدود به توزیع سطحی هستند و اطلاعات دقیقی را درباره ساختارهای عمودی اقیانوس فراهم نمی‌کنند. علاوه بر این داده‌ها باید زمانی دریافت شوند که هوا ابری نباشد. این مشکل در بعضی از مواقع سال به خصوص در منطقه مورد مطالعه وجود دارد و باعث می‌شود داده‌های پذیرفتنی به دست نیاید.

شوری سطحی شبه‌سازی شده و مقادیر ماهواره‌ای در دی ۱۳۸۷ مقایسه شد. تغییرات شوری در عمان ۳۷ تا ۳۹ و در خلیج فارس ۳۹ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. با حرکت از مرکز خلیج فارس به سمت تنگه هرمز، شوری به حدود ۳۷ psu کاهش می‌یابد. شوری در شمال غرب خلیج فارس حدود ۳۹ psu است که به تدریج در نواحی مرکزی و جنوبی افزایش می‌یابد و در قسمت‌های جنوبی خلیج فارس به بیشترین مقادیر در حدود ۴۳-۴۴ psu می‌رسد (شکل ۶). نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد قسمت عمده جریان‌های ناشی از اختلاف چگالی، از مناطق شمالی خلیج فارس شکل گرفته است و در امتداد محور اصلی خلیج فارس به سمت مرکز سرازیر می‌شود. نتایج مدل‌سازی عددی (شکل ۶-الف) با داده‌های ماهواره‌ای (شکل ۶-ب) همخوانی به نسبت خوبی دارد.

شکل ۷-الف نتایج مدل‌سازی پراکندگی کلروفیل و شکل ۷-ب میانگین تغییرات کلروفیل فصلی را با استفاده



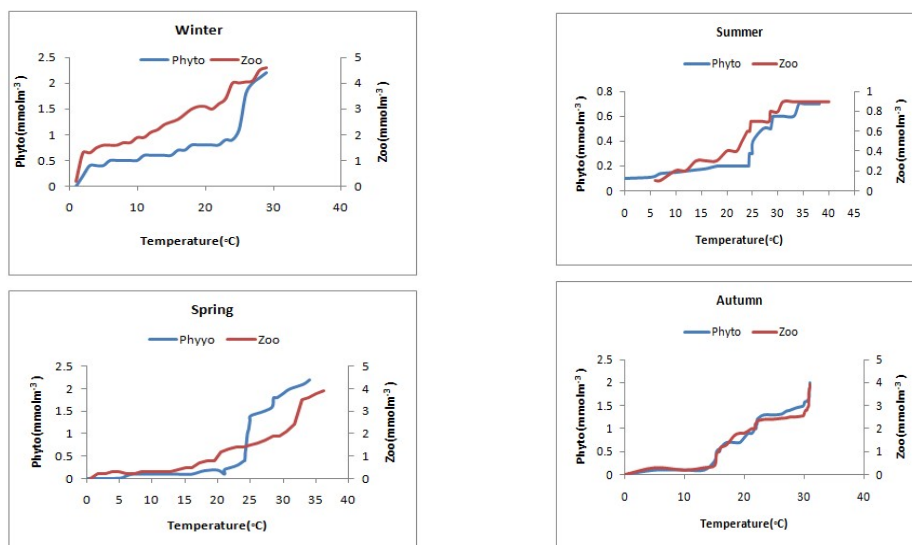
شکل ۷. میانگین تغییرات کلروفیل فصلی برحسب  $mgm^{-3}$  (الف) با استفاده از مدل‌سازی دی ماه (ب) با استفاده از ماهواره مادیس آکوا دی ماه سال ۱۳۸۷.

#### ۴ نتایج مدل

##### ۴-۱ تغییرات تراکم پلانکتون‌ها با دما

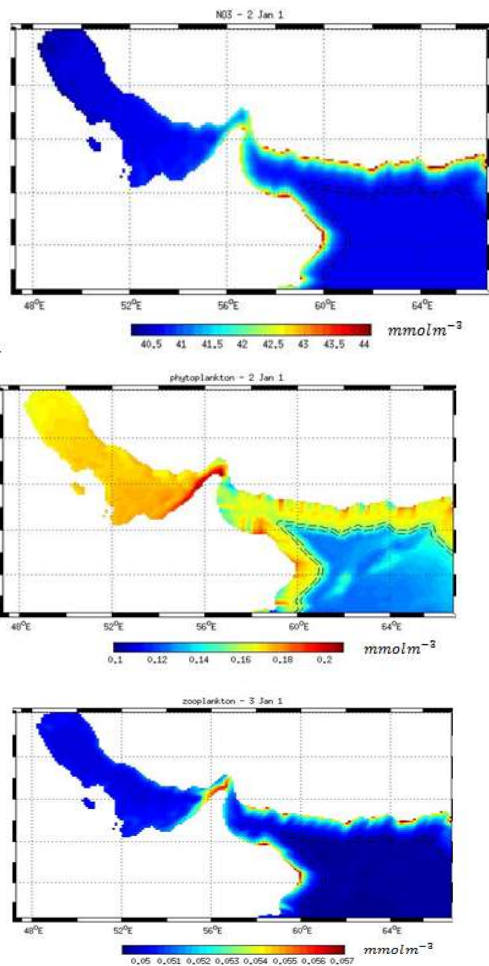
شکل ۸ تصاویر مربوط به میزان تراکم و پراکندگی پلانکتون‌ها را به صورت فصلی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشینه تراکم فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در سواحل شمالی دریای عمان در زمستان به ترتیب ۲/۳ و ۴/۸ میلی‌مول بر مترمکعب است که با شروع فصل بهار مقدار آنها به ۲/۱ و ۴ میلی‌مول بر مترمکعب می‌رسد و در تابستان مقدار آنها مقدار کمینه ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌مول بر

مترمکعب می‌رسد. با شروع فصل پاییز دوباره مقدار پلانکتون‌ها سیر صعودی نشان می‌دهد و بیشترین مقدار آنها به ۲ و ۴ میلی‌مول بر مترمکعب می‌رسد. آنچه از تصاویر دریافت می‌شود این است که بیشترین تراکم پلانکتون‌ها در ماه‌های سرد سال و کمترین آن در ماه‌های گرم سال اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه مدل‌سازی برای سال ۲۰۰۸ انجام شده است، نوع فیتوپلانکتونی که طبق پژوهش‌های انجام شده در آن سال باعث شکوفایی جلبکی شده است، از خانواده دینوفلاگیت است که در



شکل ۸ تغییرات پلانکتون‌ها با دما در زمستان، بهار، تابستان و پاییز در محدوده  $24^{\circ}N$ ,  $30^{\circ}N$  (X=۲۳۶, Y=۳۰).

پایان تابستان مقدار آنها به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. احتمالاً به دلیل وجود جریان فراچاهی که در بهار شکل گرفته است، تراکم نیترات‌ها بیشتر بوده و با افزایش نیترات‌ها، مقدار فیتوپلانکتون‌ها هم متناسب با آن افزایش پیدا کرده است. به نظر می‌رسد مقدار فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها تحت تأثیر مانسون زمستانی در اواخر زمستان و اوایل بهار افزایش داشته است و پس از آنکه فیتوپلانکتون‌ها، نیترات‌ها را مصرف کردند و زئوپلانکتون‌ها، فیتوپلانکتون‌ها را خوردند، مقدارشان به تدریج کاهش یافته است.



شکل ۹. پراکنده‌گی مواد مغذی، فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها برحسب  $\text{mmol m}^{-3}$  در دی ماه ۱۳۸۷.

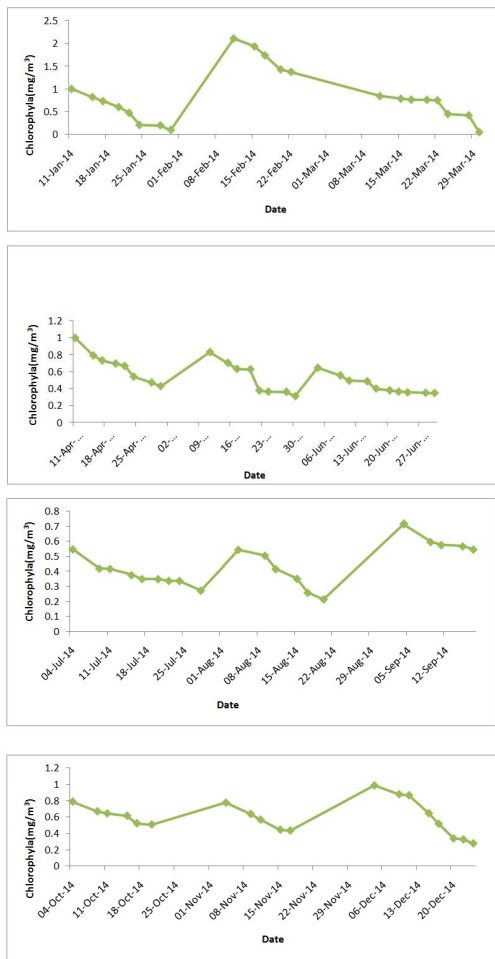
زمستان رشد می‌کند. این نوع فیتوپلانکتون باعث افزایش اکسیژن در منطقه می‌شود که به دنبال آن، عمل فتوسنتز رخ می‌دهد (حمزه‌ای و همکاران، ۲۰۱۲).

#### ۲-۴ توزیع فصلی مواد مغذی، فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها

شکل ۹ نحوه توزیع مواد مغذی، فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها را در اوایل زمستان نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد تراکم مواد مغذی از شرق به غرب از طرف تنگه هرمز به طرف دریای عمان و از دریا به سمت ساحل افزایش می‌یابد. علت افزایش مواد مغذی در اواخر پاییز و اوایل زمستان تأثیر مانسون تابستانی است که موجب بارندگی‌های شدید و آوردن مواد مغذی از خشکی به دریا و به‌خصوص در مناطق ساحلی می‌شود. از طرفی، پس از مانسون تابستانی، جریان‌های فراچاهی به وجود می‌آیند، مواد مغذی به سطح آورده می‌شوند و مواد مغذی لایه‌های سطحی افزایش می‌یابد. رشد فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها به مقدار مواد مغذی محل بستگی دارد.

شکل ۱۰ تغییرات نیترات‌ها، فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها را در یک دوره یک ساله نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیترات‌ها حدود ۰/۰۸ و ۰/۰۹ میلی‌مول بر مترمکعب در اواخر زمستان و اوایل بهار و کمترین آن حدود ۰/۰۲ میلی‌مول بر مترمکعب در اوایل تابستان به‌دست آمده است. همچنین بیشترین مقدار فیتوپلانکتون‌ها در اواخر اسفند و اوایل بهار ۰/۷۵ میلی‌مول بر مترمکعب است. در اردیبهشت تراکم آنها به ۰/۰۵ میلی‌مول بر مترمکعب رسیده و این کاهش ادامه یافته است و در مرداد ماه به کمترین مقدار می‌رسد که حدود ۰/۰۱ میلی‌مول بر مترمکعب است. بیشترین تعداد زئوپلانکتون‌ها در فروردین ماه است که برابر ۰/۰۹ میلی‌مول بر مترمکعب است. تراکم زئوپلانکتون‌ها تا پایان اردیبهشت به ۰/۰۵ میلی‌مول بر مترمکعب می‌رسد و در

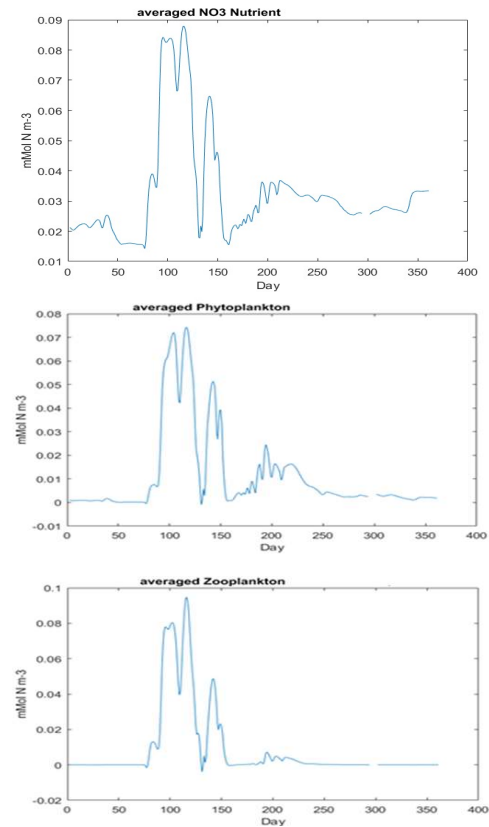
این موضوع، وجود پیچک‌هایی است که پس از مانسون تابستانی در طول ساحل ایجاد می‌شود (سیکلونی)؛ زیرا در اطراف این پیچک‌ها مقدار زیادی کلروفیل وجود دارد و مرکز این پیچک‌ها محل تجمع نوترینت‌ها است.



شکل ۱۱. میزان پراکندگی کلروفیل در زمستان، بهار، تابستان و پاییز در محدوده ۲۴° N (x=۲۳۶, y=۳۰).

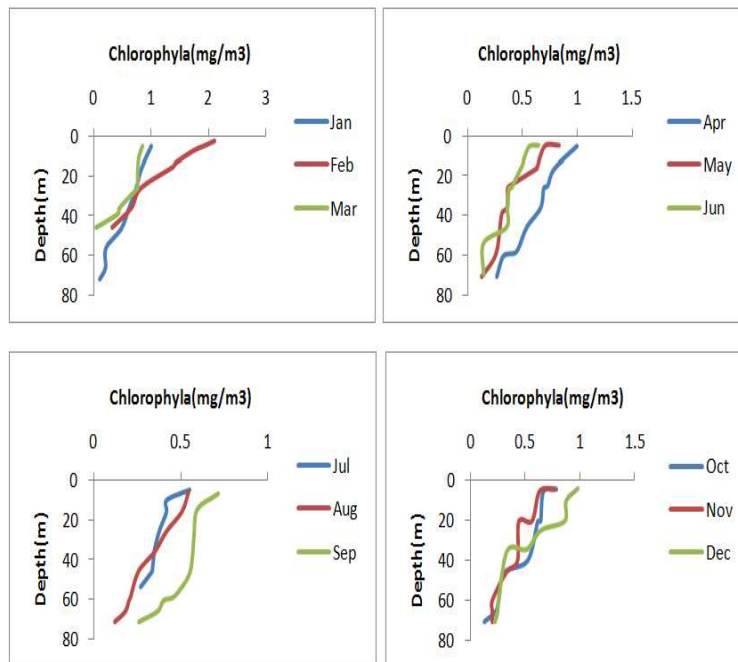
#### ۳-۴ تغییرات کلروفیل با عمق

شکل ۱۲ تغییرات کلروفیل با عمق و در فصول مختلف در نیمه شمالی دریای عمان نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار در لایه‌های ۵ تا ۱۰ متری



شکل ۱۰. سری زمانی تغییرات مواد مغذی (نیتريت)، فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها در محدوده ۲۴° N (x=۲۳۶, y=۳۰)

شکل ۱۱ تصاویر مربوط به میزان تراکم و پراکندگی کلروفیل فصلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین تراکم کلروفیل در سواحل شمالی دریای عمان در زمستان در ماه بهمن ۲ mg/m<sup>۳</sup> است. با شروع فصل بهار، از فروردین تا تیر، مقدار کلروفیل به ۳ mg/m<sup>۳</sup> و در تابستان، از تیر تا شهریور به حداقل می‌رسد (۰/۷-۰/۷ mg/m<sup>۳</sup>). با شروع فصل پاییز دوباره مقدار کلروفیل سیر صعودی نشان می‌دهد و بیشترین مقدار آن به ۳ mg/m<sup>۳</sup> در ماه آذر می‌رسد. مطابق آنچه از تصاویر دریافت می‌شود، بیشینه (کمینه) تراکم کلروفیل در ماه‌های سرد (گرم) سال اتفاق افتاده است. مقدار کلروفیل در زمستان، به علت افزایش مواد مغذی، افزایش و در تابستان به دلیل کاهش مواد مغذی کاهش می‌یابد. علت



شکل ۱۲. غلظت کلروفیل برحسب عمق در زمستان، بهار، تابستان و پاییز.

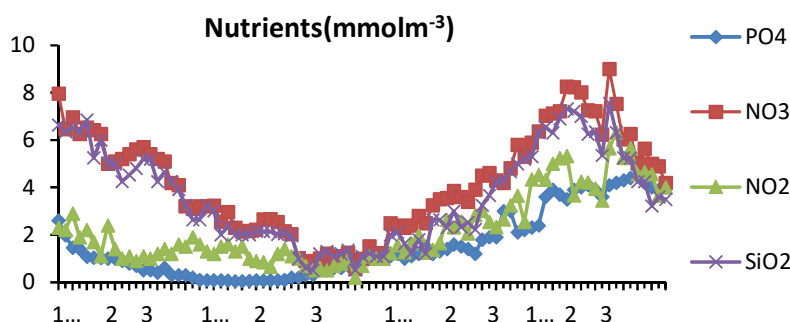
باد در فرایند فراچاهی هستند. رشد فیتوپلانکتون‌ها به مقدار مواد مغذی در منطقه بستگی دارد. رودهای متعددی از قبیل رودهای مند، هلیل‌رود، هندجان، کارون، دجله و فرات به خلیج فارس می‌ریزند. میزان سالانه رواناب رودها به خلیج فارس حدود ۴۶ سانتی‌متر است (رینولدز، ۱۹۹۳). به دلیل وجود بادهای مانسون فصلی و جابه‌جایی آب بین دریای عمان و خلیج فارس و تشدید این جابه‌جایی با رودخانه‌هایی مانند اروندرود و وجود جت‌های سریع در غرب خلیج فارس، سیکلون‌ها و آنتی‌سیکلون‌هایی از نوع دائمی و فصلی در دریای عمان ایجاد می‌شود (الجفیلی، ۱۹۹۳).

اگر مواد مغذی کافی وجود داشته باشد، شکوفایی رخ می‌دهد. در یک زمان یک یا چند گونه می‌تواند شکوفا شود. فیتوپلانکتون‌ها برای رشد به گستره‌ای از عناصر شیمیایی نیاز دارند. دو عنصر نیتروژن و فسفر بسیار مهم هستند و کاهش آنها باعث کاهش تراکم فیتوپلانکتون‌ها

است و با افزایش عمق، از غلظت آن کاسته می‌شود و در عمق حدود ۸۰ متر، مقدار آن به صفر نزدیک می‌شود. به نظر می‌رسد کاهش دما و مقدار تابش نور خورشید و مواد مغذی، تأثیر مستقیمی در کاهش مقدار کلروفیل دارد. به بیان دیگر، بیشترین پراکندگی آنها در لایه‌هایی است که از نظر شرایط دمایی و نور خورشید و مواد مغذی، بهترین شرایط زیستی را برای موجودات دریایی دارند. این نمودارها نشان می‌دهد تراکم کلروفیل در غرب تنگه هرمز به سمت خلیج فارس کاهش یافته است و تقریباً با عمق ثابت می‌ماند. با حرکت به سمت نواحی دور از ساحل دریای عمان و خلیج فارس، مقدار کلروفیل کاهش می‌یابد.

#### ۴-۴ تراکم فصلی نوترینت‌های سطحی

عوامل مهم در تولید مواد مغذی، ورودی رودخانه‌ها، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، لایه ترموکلاین و اثرهای



شکل ۱۳. تغییرات فصلی نوترینت‌های سطحی اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه (۵۷°E - ۵۸/۲°E).

است، نحوه توزیع و تراکم فیتوپلانکتون‌ها است که مصرف‌کنندگان اصلی در عمق هستند. اندازه‌گیری مواد مغذی نشان می‌دهد میزان نیتريت ( $\text{NO}_2$ ) و فسفات ( $\text{PO}_4$ ) در دوره کشتند قرمز از میزان نترات ( $\text{NO}_3$ ) و سیلیکات ( $\text{SiO}_2$ ) کمتر بوده است. از آنجاکه فیتوپلانکتون‌ها در شروع دوره شکوفایی مقدار زیادی نوترینت مصرف می‌کنند و در هنگام از بین رفتن شکوفایی، میزان تولید نوترینت‌ها زیاد است، در مقدار نوترینت‌ها نوساناتی دیده می‌شود.

#### ۴-۶ بررسی همبستگی کلروفیل با دما و نترات

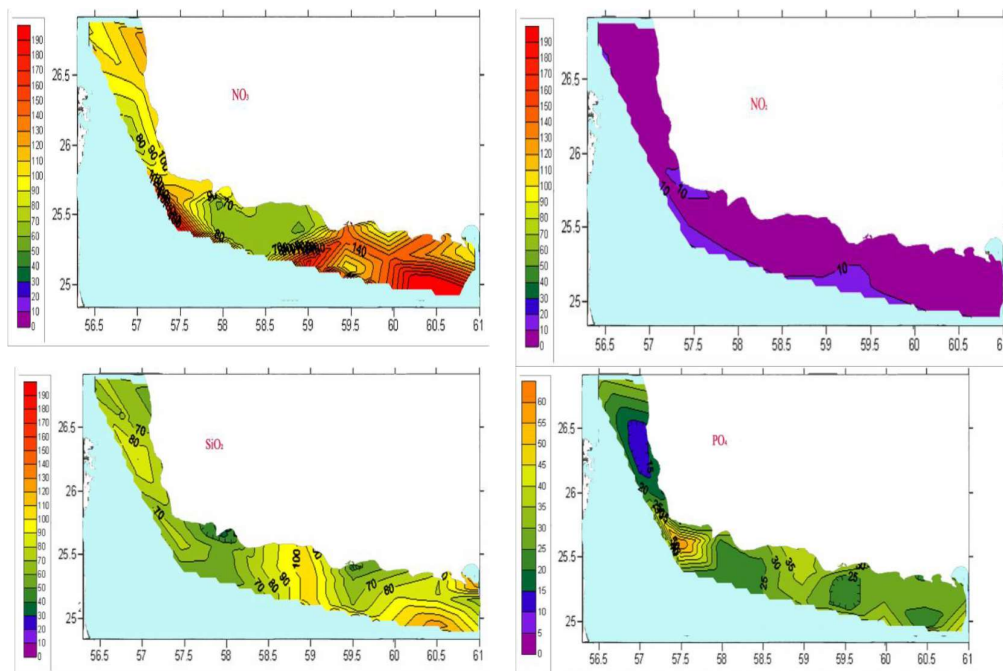
##### در زمستان و تابستان

برای بررسی ارتباط بین کلروفیل و دمای سطح آب و ارتباط کلروفیل و نترات در عمق‌های مختلف در زمستان و تابستان، شش نقطه نمونه بین ۲۴ تا ۲۶ درجه شمالی و ۵۶ تا ۵۹ درجه شرقی در عمق‌های مختلف انتخاب شد (شکل ۱۵) و نمودار همبستگی بین دو کمیت برای هر نقطه بررسی شد. تغییرات کلروفیل با دما و نترات در ماه بهمن در جدول ۲ و در ماه مرداد در جدول ۳ نشان داده شده است. میانگین نترات در قسمت‌های مختلف نیمه

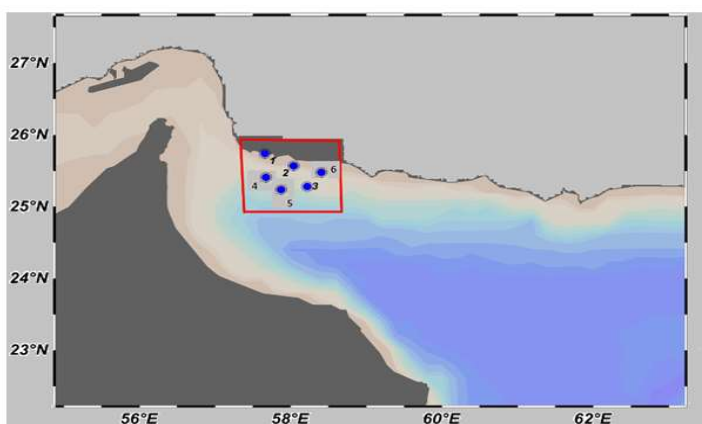
در آب می‌شود. برای بررسی ارتباط بین تراکم مواد مغذی (نترات، نیتريت، فسفات و سیلیکات) و تغییر فصل در مناطق مورد مطالعه (۵۷°E - ۵۸/۲°E) (شکل ۴)، نمودار تغییرات تراکم مواد مغذی به صورت سالیانه (سال ۱۳۸۷) رسم شده است (شکل ۱۳). مطابق شکل، غلظت موامغذی در اوایل بهار افزایش نسبی داشته و در اواخر بهار به دلیل مصرف آنها در دوره شکوفایی، کاهش یافته است و در اوایل تابستان به کمترین مقدار خود می‌رسد. تراکم در پاییز دوباره افزایش پیدا کرده است و در اواخر زمستان به بیشترین مقدار خود رسیده است.

#### ۴-۵ تغییرات تراکم مواد مغذی

بررسی توزیع تراکم مواد مغذی در محدوده مورد مطالعه (شمال دریای عمان) نشان می‌دهد به‌طور کلی غلظت مواد مغذی از سطح به عمق افزایش نسبی داشته است. تراکم مواد مغذی در لایه‌های عمقی مختلف دریا تابع عوامل محیطی مانند بارندگی، جریان‌های دریایی، ورودی رودخانه‌ها، پساب‌های شهری و تراکم فیتوپلانکتون‌ها است (شکل ۱۴). از عواملی که باعث کاهش مواد مغذی لایه‌های سطحی و میانی نسبت به لایه‌های زیرین شده



شکل ۱۴. توزیع تراکم نوترینت‌های سطحی برحسب میکروگرم بر لیتر در شمال دریای عمان.

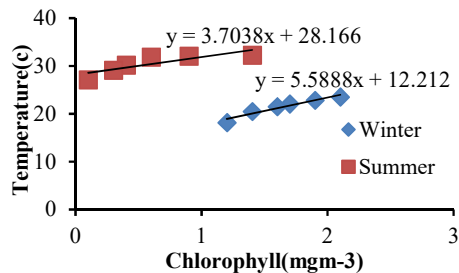


شکل ۱۵. موقعیت نقاط انتخابی برای همبستگی بین کمیت‌های مورد مطالعه.

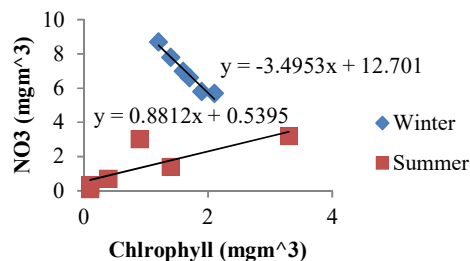
برای مقایسه نتایج، از روش آماری همبستگی پیرسون جهت تجزیه و تحلیل استفاده شد. با توجه به دو نوع وضعیت محیطی گرم (تابستان) و سرد (زمستان)، تغییرات کلروفیل و نیترات در این دو وضعیت بررسی می‌شود. طبق نتایج، بیشترین مقدار کلروفیل با  $2/1$  میلی‌گرم بر مترمکعب در زمستان و کمترین مقدار آن در تابستان با

شمالی عمان بیشتر از فسفات به دست آمده است. علت بیشتر بودن غلظت نیترات نسبت به فسفات، مقدار بیشتر نیتروژن نسبت به فسفات و حلالیت بیشتر نمک‌های آن در آب دریا است. نمک‌های نیتروژن در آب محلول هستند، اما بسیاری از نمک‌های فسفات در آب دریا نامحلول هستند و این موضوع با نتایج سازگار است.

۰/۱ میلی مول بر مترمکعب در تابستان است. به این ترتیب در زمستان و تابستان اختلاف معنی داری وجود دارد ( $p < 0/05$ ). مقدار کلروفیل با نترات در زمستان همبستگی منفی ( $r = -0/981$ ) و در تابستان همبستگی مثبت ( $r = 0/794$ ) نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، همبستگی نترات با کلروفیل در تابستان بیشتر از زمستان است (شکل ۱۷). این مسئله می تواند به دلیل فرآجوشی قوی در طول مانسون تابستانی و تزریق مواد مغذی، لایه بندی، اثر باد و جریانات دریایی در عمق باشد.



شکل ۱۶. نمودار همبستگی بین تراکم کلروفیل و دمای سطح آب برای نقاط انتخابی در زمستان و تابستان.



شکل ۱۷. نمودار همبستگی بین غلظت کلروفیل و نترات برای نقاط انتخابی در زمستان و تابستان.

## ۵ بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تغییرات فصلی پلانکتون ها و مواد مغذی در شمال دریای عمان با استفاده از جفت کردن مدل ROMS با مدل زیست شناختی NPZD پرداخته شده

۰/۱ میلی گرم بر مترمکعب به دست آمده است که اختلاف معنی داری را در زمستان و تابستان نشان می دهد ( $p < 0/05$ ). معیار پایه معنی داری است. اگر مقدار آن کمتر از  $p < 0/05$  شود، احتمال تصادفی بودن، کم و اختلاف معنی دار است و اگر بیش از  $0/05$  باشد، اختلاف معنی دار نیست. مقدار کلروفیل در زمستان (تابستان) همبستگی مثبت است و  $r = 0/966$  ( $r = 0/844$ ) را با دمای سطح آب نشان می دهد. این مسئله می تواند به دلیل وجود لایه ترموکلاین فصلی جزئی در فصل تابستان باشد.

در دریای عمان در طول سال ترموکلاین دائمی برقرار است و با تغییرات فصلی، فقط نقطه شروع و پهنای شکست لایه گرمایی تغییر می یابد.

جدول ۲. تغییرات کلروفیل با دما و نترات در ماه بهمن.

عمق (m)	کلروفیل ( $\text{mgm}^{-3}$ )	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	نترات ( $\text{mgm}^{-3}$ )
۲۰	۲/۱	۲۳/۵	۵/۷
۴۰	۱/۹	۲۲/۸	۵/۸
۶۰	۱/۷	۲۲/۱	۶/۶
۸۰	۱/۶	۲۱/۵	۷
۱۰۰	۱/۴	۲۰/۵	۷/۸
۱۲۰	۱/۲	۱۸/۲	۸/۷

جدول ۳. تغییرات کلروفیل با دما و نترات در ماه مرداد.

عمق (m)	کلروفیل ( $\text{mgm}^{-3}$ )	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	نترات ( $\text{mgm}^{-3}$ )
۲۰	۱/۴	۳۲/۳	۰/۱
۴۰	۰/۹	۳۲/۱	۰/۳
۶۰	۰/۶	۳۱/۹	۰/۷
۸۰	۰/۴	۳۰/۲	۱/۴
۱۰۰	۰/۳	۲۹/۱	۳/۲
۱۲۰	۰/۱	۲۷/۱	۳

در تابستان ترموکلاین بالا می آید و کم عمق می شود، مقدار کلروفیل کاهش و مقدار نترات هم در منطقه افزایش می یابد (شکل ۱۶). همچنین بیشترین مقدار نترات، ۸/۷ میلی مول بر مترمکعب در زمستان و کمترین مقدار آن،



فیتوپلانکتون‌ها می‌شوند. در طول مانسون تابستانی، فراچاهی ساحلی و واداشتهای محیطی می‌تواند جایگزین اثرهای پیچک‌ها شود (الهاسمی و همکاران، ۲۰۱۰). در طول مانسون زمستانی (شمال غربی) و سرد شدن پیچک‌ها طبق نتایج مدل، در زمستان تراکم مواد مغذی در اعماق دیده می‌شود. در اواخر بهار، به دلیل شکوفایی، از مقدار مواد مغذی کاسته می‌شود. تراکم مواد مغذی در ماه تیر به کمترین مقدار خود می‌رسد. براساس نتایج مدل‌سازی، از پایان فصل تابستان (شهریور)، تراکم مواد مغذی به تدریج افزایش پیدا می‌کند، غلظت نیترات‌ها احتمالاً به دلیل وجود جریان فراچاهی که در بهار شکل گرفته است، افزایش می‌یابد، فیتوپلانکتون‌ها به تدریج در اواخر بهار کمتر می‌شوند و اوایل تابستان به کمترین مقدار خود می‌رسند.

مقدار کلروفیل و توزیع پلانکتون‌ها با استفاده از مدل‌سازی و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد تراکم پلانکتون‌ها در نزدیکی سواحل، بیشتر از مناطق دور از ساحل است که این مسئله بیانگر آن است که به علت وجود مواد مغذی و اکسیژن، شرایط رشد پلانکتون‌ها در آب‌های نزدیک به خط ساحلی مناسب‌تر است.

عوامل مؤثر در دینامیک شکوفایی پلانکتونی در جنوب غربی جزیره ونکوور (اقیانوس آرام) با استفاده از مدل سه-بعدی ROMS جفت‌شده با مدل زیست‌شناختی NPZD بررسی شد. نتایج مدل نشان داد پیچک جان دفکا در توزیع فیتوپلانکتون‌ها مؤثر است و مواد مغذی، بیشتر در اطراف پیچک‌های آنتی‌سیکلونی تمرکز یافته‌اند (پنا، ۲۰۰۹)

در دوره یک ساله بررسی‌شده، بیشترین مقدار فیتوپلانکتون‌ها در اواخر اسفند و اوایل بهار است و در اواخر بهار، از مقدار آنها کاسته می‌شود. این کاهش ادامه می‌یابد و در مرداد ماه به کمترین مقدار خود می‌رسد. تحقیقات روبردا و همکاران (۲۰۱۴) درباره مدل سه‌بعدی

است. مدل NPZD که شامل مواد مغذی، فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون و ریزموجودات است، یک مدل ساده مواد مغذی است که پلانکتون‌ها و ریزموجودات در آن، ردیاب‌هایی هستند که به صورت صریح رفتار می‌کنند.

تغییر دما از عوامل اصلی فراوانی مقدار فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها است. دمای مناسب برای رشد پلانکتون‌ها بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد مقدار آنها در زمستان بیشتر بوده و در بهار و تابستان روند کاهشی داشته است. در دمای ۳۰ درجه، رشد پلانکتون‌ها محدود شده است که نشان می‌دهد دما عامل محدودکننده در فصل گرما است. در پاییز و با سرد شدن هوا، مقدار آنها دوباره افزایش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد تغییر دما از متغیرهای اصلی در فراوانی میزان پلانکتون‌ها است. پیچک‌های سیکلونی و آنتی‌سیکلونی که بیانگر فراچاهندگی در دریای عمان و تنگه هرمز هستند، باعث انتقال کلروفیل از مناطق جنوبی دریای عمان به نواحی شمالی و در نهایت، تنگه هرمز و خلیج فارس می‌شوند (شریفی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۵).

مقدار کلروفیل و مواد مغذی به هم وابسته هستند؛ مقدار کلروفیل با مواد مغذی کنترل می‌شود. مقدار کلروفیل در طول زمستان در مقایسه با تابستان بیشتر است. علت این مسئله می‌تواند ترموکلاین فصلی باشد که با وجود در دسترس بودن مواد مغذی در تابستان، لایه ترموکلاین مانع شکوفایی می‌شود. در تابستان لایه ترموکلاین در دریای عمان با شیب بیشتری نمایان می‌شود و لایه‌بندی ضعیف‌تری نسبت به زمستان وجود دارد؛ بنابراین به نظر می‌رسد با وجود لایه ترموکلاین قوی، پیچک‌هایی قوی لازم است تا سبب آمیختگی مواد مغذی و آوردن آنها به سطح شود. در زمستان کاهش عمق لایه ترموکلاین و نوتروکلاین و لایه‌بندی قوی بر جریانات همرفتی تأثیر دارد. در این حالت، پیچک‌های سرد قادر به انتقال مواد مغذی به لایه نوری سطح هستند و باعث شکوفایی

بهترین شرایط زیستی را برای فتوسنتزکنندگان دریایی دارد (دورگام و مفتاح، ۱۹۸۹).

پیونتکوسکی و همکاران (۲۰۱۲) پیچک‌ها و تغییرپذیری کلروفیل را با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای در دریای عمان بررسی کردند. نتایج نشان داده است پیچک‌هایی با طول ۲۰۰ کیلومتر و طول عمر تقریبی یک ماه در ساحل عمان وجود دارند که تعداد آنها دور از ساحل کاهش می‌یابد. تجمع کلروفیل در اطراف پیچک‌های سیکلونی نسبت به پیچک‌های آنتی‌سیکلونی بیشتر است (پیونتکوسکی و همکاران، ۲۰۱۲).

صدیق مروستی و همکاران (۲۰۱۶) جهت بررسی عوامل مؤثر در کشند قرمز با مدل مینی‌بلینگ که از نسخه‌های مدل GFDL است، شبیه‌سازی عددی پیچک‌ها را انجام دادند. مدل نشان داد تراکم کلروفیل در اطراف لبه‌ها بیشتر از مرکز پیچک‌ها است. حمزه‌ای و همکاران (۲۰۱۳) پدیده کشند قرمز را در خلیج فارس و دریای عمان با نرم‌افزار یک‌بعدی PROBE بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد پدیده کشند قرمز از سواحل کشور عمان در دریای عرب شروع شده است و پس از حرکت به سمت جنوب دریای عمان با جریان ناشی از پیچک‌های میان‌مقیاس در این ناحیه که در بیشتر مواقع سال فعال هستند، به شمال دریای عمان و سواحل شمالی تنگه هرمز کشیده شده است. همچنین با افزایش دما، شوری و مواد مغذی، میزان پلانکتون‌ها افزایش می‌یابد. نتایج بررسی تراکم مواد مغذی و روند تغییرات در لایه‌های سطحی نیمه شمالی دریای عمان نشان داد به‌طور کلی غلظت مواد مغذی (نترات، فسفات و سیلیکات) در فصل پاییز بعد از مونسون بیشتر از فصل بهار قبل از مونسون بوده است. همچنین تراکم مواد مغذی از تنگه هرمز به سمت دریای عمان افزایش می‌یابد. علت اصلی افزایش مواد مغذی در پاییز نسبت به بهار، مونسون تابستانی است. پدیده مانسون در تابستان باعث بارندگی‌های شدید و در نتیجه، مواد

ROMS جفت‌شده با مدل زیست‌شناختی NPZD، جهت بررسی تغییرات فصلی فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها در منطقه ایبرین (Iberian) واقع در شمال شرقی اقیانوس اطلس، بیانگر تراکم فیتوپلانکتون‌ها و کلروفیل در بهار و اوایل تابستان به دلیل وجود فراچاهی در منطقه و شکوفایی دوباره در اواخر تابستان و اوایل پاییز است (رپوردا و همکاران، ۲۰۱۴).

بررسی تغییرات زئوپلانکتون‌ها در یک دوره یک‌ساله، بیشترین مقدار آنها را در فروردین ماه نشان می‌دهد که تراکم آنها با گرم شدن هوا به شکل محسوسی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد یکی از عوامل مهم و مؤثر در افزایش مقدار پلانکتون‌ها، تأثیرگذاری جریانات جنوب شرقی در مونسون تابستانی است که به دنبال این جریانات، مواد مغذی و نوترینت‌ها از بستر جدا می‌شوند و شرایط محیطی مناسب برای رشد و تکثیر پلانکتون‌ها فراهم می‌شود (پیونتکوسکی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین بادهای مانسون باعث اختلاط لایه‌های آب می‌شوند و مواد غذایی را از لایه‌های عمقی به لایه‌های سطحی آب انتقال می‌دهند. علاوه بر این، جریانات فراچاهی عامل دیگری جهت رشد و تکثیر پلانکتون‌ها هستند. شکوفایی فیتوپلانکتون‌ها اندکی زودتر از شکوفایی زئوپلانکتون‌ها رخ می‌دهد؛ بنابراین در اوایل بهار به علت افزایش فیتوپلانکتون‌ها و فراهم شدن غذای کافی برای زئوپلانکتون‌ها، مقدار آنها نسبت به تابستان افزایش می‌یابد (ناقوی و همکاران، ۲۰۱۰).

تغییرات عمودی کلروفیل و روند فصلی آن در نیمه شمالی دریای عمان نشان می‌دهد بیشترین پراکنش و تراکم در لایه‌های سطحی است و با افزایش عمق از تراکم آن کاسته می‌شود. به نظر می‌رسد کاهش دما و مقدار تابش نور خورشید تأثیر مستقیمی در کاهش مقدار کلروفیل دارد. به بیان دیگر، بیشترین پراکنش کلروفیل در لایه‌هایی است که از نظر شرایط دمایی و نور خورشید،

است. پدیده فراجوشی در امتداد سواحل ایران در اوایل فصل پاییز (در شرق تنگه هرمز) باعث افزایش آب‌های ساحلی از مواد مغذی به‌ویژه نیترات می‌شود و به دنبال آن کلروفیل افزایش می‌یابد.

آب‌های غنی از مواد مغذی که در عمق ۱۰ تا ۵۰ متر در زیر لایه ترموکلاین هستند، از راه تنگه هرمز، از دریای عمان به جنوب خلیج فارس نفوذ می‌کنند. وجود یک لایه ترموکلاین دائمی و وجود فیتوپلانکتون‌ها در ناحیه نورگیر (euphotic)، دلیل کاهش مواد مغذی در بالای لایه ترموکلاین است. تحقیقات نشان داده است نیترات‌ها بیشتر در لایه‌های پایین یافت می‌شوند؛ بنابراین نیترات می‌تواند عامل محدودکننده (limiting factor) برای تولیدات اولیه فرض شود (سن گوپتا و همکاران، ۱۹۸۰).

نیتروژن و فسفر، از نوترینت‌های مهم و از عوامل محدودکننده رشد در فیتوپلانکتون‌ها هستند. بر اساس نسبت ردفیلد، نسبت نیتروژن و فسفر مورد نیاز (P:N) در یک سلول پلانکتونی ۱:۱۶ است. به همین نسبت، تراکم آنها در آب هم متفاوت است به طوری که نسبت فسفات کمتر از نیترات است (ریان و همکاران، ۲۰۰۵). تراکم فسفات و نیترات در زمان شکوفایی کاهش و دوباره افزایش می‌یابد.

به دلیل تنوع گونه‌های فیتوپلانکتون، بعضی از گونه‌ها با مواد مغذی نیترات و نیتريت و برخی دیگر با فسفات بستگی مثبتی نشان می‌دهند که این موضوع باعث نوسانات تولید اولیه در منطقه مورد نظر می‌شود (سلوین پیچچایکانی و همکاران، ۲۰۱۶).

نتایج بیان می‌کنند روند تغییرات کلروفیل حاصل از مدل‌سازی مشابه تصاویر ماهواره‌ای است و استفاده از این مدل عددی برای بررسی تغییرپذیری فصلی حرکت فیتوپلانکتون‌ها و ژئوپلانکتون‌ها مناسب است. تغییرات در مکان حرکت پلانکتون‌ها از تغییرات در مکان پیچک‌ها ناشی می‌شود و چون حرکت پیچک‌ها پدیده‌ای

مغذی در نواحی ساحلی می‌شود. از طرفی، وقوع مانسون تابستانی باعث جریان‌های دریایی و جریان‌های فراجاهی و انتقال مواد مغذی از لایه‌های عمقی به لایه‌های سطحی می‌شود. رینولدز (۱۹۹۳) در مطالعات خود عوامل محیطی منطقه از قبیل دما، شوری، چگالی و جریان‌های دریایی محدوده آب‌های سواحل جاسک را جزء مناطق آب‌های فراجاهی گزارش کرده است.

مقدار کلروفیل در زمستان یک همبستگی مثبت (r=۰/۹۶۵) را با دمای سطح آب نشان می‌دهد، در حالی که در تابستان، همبستگی منفی (r=-۰/۵۴۹) دارد. تراکم کلروفیل در زمستان و تابستان اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد (p < ۰/۰۵).

بیشترین مقدار نیترات ۸/۷ میلی‌مول بر مترمکعب در زمستان و کمترین مقدار آن ۰/۱ میلی‌مول بر مترمکعب در تابستان است که در زمستان و تابستان اختلاف معنی‌داری وجود دارد (p < ۰/۰۵). مقدار کلروفیل با نیترات در زمستان و تابستان وابستگی مثبت را نشان می‌دهد که به ترتیب مقدار آن ۰/۲۶۸ و ۰/۷۹۶ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، همبستگی نیترات با کلروفیل در تابستان بیشتر از زمستان به‌دست آمده است. این مسئله می‌تواند به دلیل فراجوشی قوی در طول مانسون تابستانی و تزریق مواد مغذی در عمق باشد. کاهش درجه حرارت و کاهش مواد مغذی تأثیر مستقیمی در کاهش مقدار کلروفیل دارد. مقدار و نسبت مواد مغذی و فیتوپلانکتون‌ها در منطقه شمال دریای عمان تحت تأثیر پدیده‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی است. رشد فیتوپلانکتون‌ها به‌شدت تحت تأثیر مواد معدنی نیتروژن، فسفر و سیلیسیوم است. فراجوشی آب‌های غنی از مواد مغذی ناشی از مانسون، طوفان‌ها، ورود مواد مغذی از مناطق ساحلی و ورود آب‌های شور از سمت تنگه هرمز از جمله این عوامل هستند. همبستگی کلروفیل با نیترات در تابستان بیانگر نقش مانسون تابستانی در تجدید مواد مغذی

روحانی قادیکلایی، ک.، عبدالعلیان، ع.، فروغی فرد، ح.، معزی، م.، زاهدی، م.، مرتضوی، م.، ۱۳۹۶، آلودگی ناشی از شکوفایی‌های مضر جلبکی و اثرات آن بر اکوسیستم‌های دریایی: نوزدهمین همایش ملی صنایع دریایی.

قاضی، ا.، علی‌اکبری بیدختی، ع.، عظام، م.، ۱۳۹۴، بررسی ویژگی‌های فیزیکی ساختار لایه‌ای در دریای عمان: سومین کنفرانس بین‌المللی اقیانوس‌شناسی خلیج فارس.

دریانبرد، غ.، حسینی، ع.، ولی‌نسب، ت.، ۱۳۸۳، تعیین میزان توده زنده کف زیان به روش مساحت جاروب شده در دریای عمان (آبهای استان سیستان و بلوچستان): موسسه تحقیقات شیلات ایران، ۸۱۸.

Abbaspour, M., and Zohdi, E., 2018, Red tide development modeling in Persian Gulf and study nutrients effects on algal bloom: *Research in Marine Sciences*, 3, 289-302.

Al-Jufaili, S., Al-Jabri, M., Al-Baluchi, A., Baldwin, R.M., Wilson, S.A., West, F., Matthews, A.D., 1993, Human impacts on coral reefs in the Sultanate of Oman: *Estuar. Coast. Shelf Sci*, 49, pp. 65-74

Al-Hashmi, K. A., Claereboudt, M. R., Al-Azri, A. R., and Piontovski, S. A., 2010, Seasonal changes of chlorophyll and environmental characteristics in the Sea of Oman: *The Open Oceanography Journal*, 4, 107-114.

Anderson, M., 1994, Red Tides: *Scientific American Journal*, 271, 52-58.

Banse, K., Naqvi, S. W. A., Narvekar, P. V., Potal, J. R., and Jayakumar, D. A., 2014, Oxygen minimum zone of the open Arabian Sea: Variability of oxygen and nitrite from daily to decadal timescales: *Biogeosciences*, 11, 2237-2261.

Batchelder, H. P., Edwards, C. A., and Powell, T. M., 2002, Individual-based models of copepod populations in coastal upwelling regions: implications of physiologically and environmentally influenced diel vertical migration on demographic success and nearshore retention: *Progress in Oceanography*, 53(2-4), 307-333.

Dorgham, M. M., and Moftah, A., 1989, Environmental conditions and phytoplankton

پیش‌بینی‌نشدنی است، مغایرت‌هایی در خروجی مدل به‌دست می‌آید که متفاوت از تصاویر ماهواره‌ای است. این مدل نشان داد پیچک‌ها بیشتر کلروفیل را در اطراف خودشان جمع می‌کنند. این کار سبب می‌شود غلظت کلروفیل در اطراف لبه‌ها بیشتر از مرکز پیچک شود. پیچک‌ها در این منطقه باعث فراهم آوردن مواد مغذی می‌شوند؛ پخش پیچکی، عامل مهمی در این فرایند است. همچنین محدودیت مدل در شبیه‌سازی لایه‌بندی و میزان نفوذ نور تابشی می‌تواند دلیل تفاوت‌ها باشد. از آنجا که اندازه‌گیری‌های میدانی پارامترهای بوم‌شناسی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است، امروزه کاربرد مدل‌های عددی در پیش‌بینی بسیاری از پارامترهای هیدروفیزیکی و زیستی رایج شده است. چون عوامل فیزیکی و فرایندهای بیوژئوشیمیایی به‌شدت بر جمعیت پلانکتون‌ها و میزان تولید در دریاها تأثیرگذار هستند، مدل‌سازی فرایندهای بوم‌شناسی اهمیت ویژه‌ای دارد. فرایندهای بوم‌شناسی بسیار پیچیده هستند و اثرهای تداخلی متعددی بر یکدیگر دارند؛ لذا برای مدل‌سازی این فرایندها به جمع‌آوری داده‌های محیطی بسیار زیادی نیاز است.

جهت توسعه این مدل عددی پیشنهاد می‌شود با تصحیح اختلاط، ترموکلاین قوی‌تری در مدل ایجاد شود که بتواند مواد مغذی را به صورت واقعی‌تر مدل‌سازی کند. همچنین ورودی آب رودخانه‌ها باید تصحیح شود تا وجود عناصر سطحی در مدل، باعث بروز مشکلات نشود.

#### منابع

خاتمی، ش.، ولی‌نسب، ت.، سراجی، ف.، ۱۳۹۱، بررسی نوسانات فصلی فیتوپلانکتون‌ها در آب‌های ساحلی جزیره لارک در خلیج فارس: *مجله زیست‌شناسی ایران*، ۲۵(۱)، ۱-۶.

- distribution in the Persian Gulf and Gulf of Oman, September 1986: *Journal of the Marine Biological Association of India*, **31**(1), 36-53.
- Edwards, C. A., Batchelder, H. P., and Powell, T. M., 2000, Modeling microzooplankton and macrozooplankton dynamics within a coastal upwelling system: *Journal of Plankton Research*, **22**(9), 1619-1648.
- Fennel, K., Losch, M., Schröter, J., and Wenzel, M., 2001, Testing a marine ecosystem model: sensitivity analysis and parameter optimization: *Journal of Marine Systems*, **28**(1-2), 45-63.
- Gilbert, P. A., 2007, Eutrophication and harmful algal blooms. A complex global issue, examples from the Arabian seas including Kuwait bay and an introduction to the global ecology and oceanography of harmful algal blooms (GEOHAB) program: *International Journal of Oceans and Oceanography*, **2**(1), 157-169.
- Haidvogel, D. B., and Beckmann, A., 1999, *Numerical Ocean Circulation Modeling*: Imperial College Press, London, UK, p. 330.
- Hamzehei, S., Bidokhti, A., Mortazavi, M., and Gheiby, A., 2013, Red tide monitoring in the Persian Gulf and Gulf of Oman using MODIS sensor data: *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, **12**, 1100-1107.
- Hamzehei, S., Bidokhti, A. A., Mortazavi, M. S., and Gheibi, A., 2012, Utilization of satellite imageries for monitoring harmful algal blooms at the Persian Gulf and Gulf of Oman: 2012 International Conference on Environmental, Biomedical and Biotechnology IPCBEE, Singapore, **41**, 71-174.
- Kimberly, H. H., and Bethan, M. J., 2015, Phytoplankton strategies for photosynthetic energy allocation: *Annual Review of Marine Science*, **7**, 265-297.
- Lee, J., Kim, T., and Moon, J., 2016, Application of ROMS-NPZD coupled model for seasonal variability of nutrient and chlorophyll at surface layer in the Northwestern Pacific: *Ocean and Polar Research*, **38**(1), 1-19.
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., and Shchepetkin, A., 2003, Equilibrium structure and dynamics of the California Current System: *Journal of Physical Oceanography*, **33**(4), 753-783.
- Naqvi, S. W. A., 1994, Denitrification processes in the Arabian Sea: *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, **103**(2), 279-300.
- Naqvi, S. W. A., Moffett, J. W., Gauns, M. U., Narvekar, P. V., Pratihary, A. K., ... , and Ahmed, S. I., 2010, The Arabian Sea as a high-nutrient, low-chlorophyll region during the late Southwest Monsoon: *Biogeosciences*, **7**, 2091-2100.
- Peña, M. A., 2009, Modeling of biogeochemical cycles and climate change on the continental shelf: An example from the Pacific coast of Canada: *Proceeding of the Fourth Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas*, 49-54.
- Piontkovski, S. A., Al-Maawali, A., Al-Manthri, W. A. M., Al-Hashmi, K., and Popova, E. A., 2014, Zooplankton of Oman coastal waters: *Journal of Agricultural and Marine Sciences*, **19**, 37-50.
- Piontkovski, S. A., Nezlin, N. P., Al-Azri, A., and Al-Hashmi, K., 2012, Mesoscale eddies and variability of chlorophyll-a in the Sea of Oman: *International Journal of Remote Sensing*, **33**(17), 5341-5346.
- Powell, T. M., Lewis, C. V., Curchitser, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J., and Dobbins, E. L., 2006, Results from a three dimensional, nested biological physical model of the California Current System and comparisons with statistics from satellite imagery: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **111**(C7).
- Reboreda, R., Nolasco, R., Castro, C. G., Álvarez-Salgado, X. A., Cordeiro, N. G., Queiroga, H., and Dubert, J., 2014, Seasonal cycle of plankton production in the Iberian margin based on a high resolution ocean model: *Journal of Marine Systems*, **139**, 396-408, Doi:10.1016/j.jmarsys.2014.08.004.
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H., and Richards, F. A., 1963, The influence of organism on the composition of sea water: *The Sea*, **2**, 26-77.
- Reynolds, R. M., 1993, Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz and the Gulf of Oman - Results from the Mt Mitchell expedition: *Marine Pollution Bulletin*, **27**, 35-39.
- Ryan, J. P., Chszez, F. P., and Bellingham, J. G., 2005, Physical-biological coupling in Monterey Bay, California: topographic influences on phytoplankton ecology. *Marine Ecology progress series*, **287**, 23-32.
- Sedigh Marvasti, S., Gnanadesikan, A., Bidokhti, A. A., Dunne, J. P., and Ghader, S., 2016, Challenges in modeling spatiotemporally varying phytoplankton blooms in the

- Northwestern Arabian Sea and Gulf of Oman: *Biogeosciences*, **13**(4), 1049-1069.
- Selvin Pitchaikani, J., and Lipton, A. P., 2016, Nutrients and phytoplankton dynamics in the fishing grounds off Tiruchendur coastal waters, Gulf of Mannar, India: Springer Plus, **5**, 1405.
- Sen Gupta, R., Moraes, C., George, M. D., Kureishy, T. W., Noronha, R. J., and Fondekar, S. P., 1980, Chemistry and hydrography of the Andaman Sea. *Indian Journal of Marine Sciences*, **10**, 228-233.
- Sharifinia, M., Penchah, M. M., Mahmoudifard, A., Gheibi, A., and Zare, R., 2015, Monthly variability of chlorophyll- $\alpha$  concentration in Persian Gulf using remote sensing techniques: *Sains Malaysiana*, **44**(3), 387-397.
- Shchepetkin, A. F., and McWilliams, J. C., 2003, A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **108**(C3).
- Smith, S., Roman, M., Prusova, I., Wishner, K., Gowing, M., Codispoti, L. A., Barber, R., Marra, J., and Flagg, C., 1998, Seasonal response of zooplankton to monsoonal reversals in the Arabian Sea: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **45**(10-11), 2369-2403.
- Spitz, Y. H., Newberger, P. A., and Allen, J. S., 2003, Ecosystem response to upwelling off the Oregon coast: Behavior of three nitrogen-based models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **108**(C3).
- Yan, T., and Zhou, M. J., 2004, Environmental and health effects associated with Harmful Algal Bloom and marine algal toxins in China: *Biomedical and Environmental Sciences: BES*, **17**(2), 165-176.

## Numerical simulations of seasonal changes of plankton and minerals in the north of Oman Sea using the ROMS-NPZD paired model

Haleh Samini<sup>1</sup>, Abbasali Aliakbari Bidokhti<sup>2\*</sup>, Mojtaba Ezam<sup>3</sup> and Tooraj Valinassab<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D Student, Department of Natural Resources and Environment Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environment Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Professor, Academic Relations and International Affairs Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

(Received: 27 September 2020, Accepted: 24 February 2021)

### Summary

In this study, the seasonal changes of plankton in the north of Oman Sea have been investigated using the three-dimensional Regional Ocean Modeling System (ROMS) model. The initial conditions of the model follow the preliminary conditions as in WOA5 data with a horizontal resolution of 0.25 degrees and a time step of 300 seconds for one year. Vertical coordinate data were for 30 layers sigma levels by interpolations in the vertical direction of temperature and salinity. Due to the greater sub-model compatibility, ROMS model is coupled with Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus (NPZD) model. The simulation results showed that: (1) Temperature change is one of the main factors in the frequency of phytoplankton and zooplankton blooms; (2) Clock and counterclockwise Eddies, which represent the phenomenon of extra down or upwells in the Sea of Oman and the Strait of Hormuz, causes the transfer of chlorophyll from the south to the north; (3) The amount of chlorophyll is higher during winter compared to summer. It can be due to the presence of seasonal thermocline layer which prevents blooming despite the availability of nutrients; (4) The phytoplankton concentration changes in a period of one year shows that their maximum value is in late March and early spring, and April is the peak of zooplankton due to the increase in phytoplankton population. Moreover, the density of plankton depends mainly on mineral nutrients, therefore, the availability of minerals is often considered as a key factor in their growth and metabolism; (5) Chlorophyll content shows a positive correlation with water surface temperature in winter ( $r = 0.965$ ), while a negative one in summer ( $r = -0.549$ ). There is a significant difference between chlorophyll density in winter and summer ( $p < 0.05$ ). There was a positive correlation between amount of chlorophyll and nitrate in winter ( $r = 0.268$ ) and summer ( $r = 0.794$ ), which suggests a significant difference between winter and summer (for  $p < 0.05$ ); (6) There were good agreements between satellite observations of temperature and chlorophyll and the values measured in numerical modeling in majority of the cases.

**Keywords:** Oman Sea, numerical simulation, ROMS-NPZD, plankton, minerals.

---

\*Corresponding author:

bidokhti@ut.ac.ir