

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.2.8.4

درصد همانندی: ۰٪

شبیه‌سازی سه‌بعدی تغییرات فصلی متغیرهای بیولوژیکی خلیج فارس با استفاده از یک مدل NPZD حسن اکبری نیا^۱، مجتبی عظام^{۲*}، پرگل قوام مصطفوی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران
hasan.akbarinia@srbiau.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران
ezam@srbiau.ir

^۳ استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران
mostafavi_pa@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷

چکیده

در این پژوهش از یک مدل جفت شده فیزیکی-بیولوژیکی ROMS به منظور بررسی تغییرات فصلی پارامترهای بیولوژیکی خلیج فارس استفاده شده است. مدل بیولوژیکی هفت متغیر حالت شامل دو ماده مغذی، فیتوپلانکتون، کلروفیل، زئوپلانکتون و دو دترایتوس کوچک و بزرگ ($N_2PChIZD_2$) دارد. نتایج اجرای مدل حاکی از این است که الگوی تغییرات ماهانه کلروفیل آ در خلیج فارس را می‌توان به دو منطقه تفکیک کرد. منطقه اول بخش شمال غربی است که رشد کلروفیل آ، در آن از بهار آغاز می‌شود و تا اواخر تابستان و اوایل پاییز در امتداد سواحل جنوبی به طرف شرق گسترش می‌یابد و مقدار آن، در تمام طول سال بیشتر از سایر مناطق است و اوج آن در اوایل بهار است. منطقه دوم که شامل بخش‌های میانی خلیج فارس و تنگه هرمز است، در تابستان بارور می‌شود و بیشترین مقدار آن در اواخر تابستان تا اوایل پاییز می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که الگوی رشد و گسترش کلروفیل آ در خلیج فارس یک استقلال نسبی از الگوی تغییرات فصلی کلروفیل آ دریای عمان دارد و تغییرات کلروفیل آ، آن از الگوی جریان‌ات خلیج فارس تبعیت می‌کند. علاوه بر این مدل نشان می‌دهد که در شمال غربی خلیج فارس مقدار نترات غلظت بالایی دارد که علتی برای شکوفایی فیتوپلانکتونی از بخش شمال غربی خلیج فارس و گسترش آن به سایر مناطق همراه با جریان‌های منطقه است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، کلروفیل، بیوژئوشیمی، مواد مغذی، خلیج فارس

۱. مقدمه

امروزه، غلظت گاز کربنیک جو و بررسی تأثیر آن بر تغییرات آب و هوایی به یکی از مهم‌ترین موضوعات اکوسیستم‌ها تبدیل شده است. در این میان اقیانوس‌ها که حدود ۷۰٪ سطح کره زمین را پوشش می‌دهند و بزرگ‌ترین مخازن کربن موجود در زمین هستند از طریق فرایندهای بیوژئوشیمیایی^۱ با جذب گاز کربنیک از جو و انتقال آن به شکل مواد آلی و غیرآلی به اعماق آب، مقدار این گاز را در اتمسفر کره زمین کنترل می‌کنند. تخمین زده می‌شود حدود یک‌سوم گاز کربنیک تولیدشده از فعالیت‌های انسانی را اقیانوس‌ها جذب می‌کنند [۱] و ۵۰٪ کل تولید اولیه فتوسنتزی کره زمین نیز در اقیانوس‌ها انجام می‌شود، چرخه غذایی اقیانوسی از این طریق فراهم می‌شود [۲].

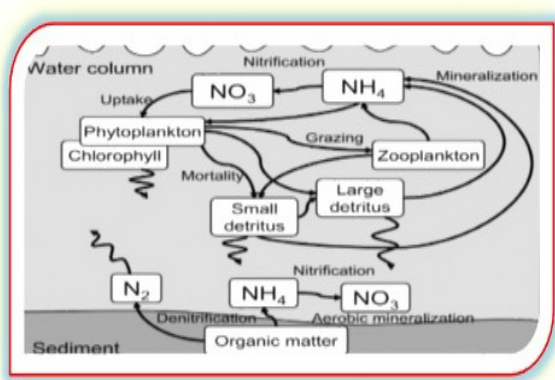
به‌همین دلیل در دهه‌های اخیر طیف گسترده‌ای از زیر مدل‌های اکوسیستمی با قابلیت‌های مختلف به‌منظور مطالعه رفتار اکوسیستم‌های دریایی توسعه یافته، و پاسخ پارامترهای بیولوژیک نسبت به واداشت‌های جوی و اقیانوسی مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از مدل‌های به‌نسبت پیچیده مدل NPZD با تعداد متغیر حالت متفاوت است. متغیرهای حالت مدل شامل؛ مواد مغذی (N)، فیتوپلانکتون‌ها (P)، زئوپلانکتون‌ها (Z) و دترایتوس‌ها (D) هستند که با توجه به امکانات محاسباتی، با در نظر گرفتن یا صرف نظر از تنوع هر کدام، مدل مورد نظر می‌تواند ساده‌تر یا پیچیده‌تر شود. این مدل به خاطر توانایی در شبیه‌سازی واقع‌بینانه اکوسیستم‌های دریایی در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است که نمونه‌ای از این پژوهش‌ها عبارت‌اند از: مطالعه جامع منطقه برمودا توسط فشم و همکاران [۳]، بررسی بودجه نیتروژن در آتلانتیک شمالی فنل و همکاران [۴]، استفاده از زیر مدل EBUS^۲ برای مناطق کم اکسیژن گوتنچت و همکاران [۵]، مطالعه جریان کالیفرنیا؛ پاول و همکاران [۶]، استفاده از زیر مدل PISCES-V2^۳ برای محاسبه بودجه کربن در پژوهش آمونیت و همکاران [۷]. مهم‌ترین مطالعات عددی در خلیج فارس بیشتر درباره خصوصیات جریان‌ات و الگوهای

گردش آب در این منطقه بوده و پارامترهای بیوژئوشیمیایی آن تنها در بعضی از ایستگاه‌های ساحلی و به‌صورت میدانی اندازه‌گیری شده و کمبود مطالعه جامع در این خصوص محسوس است. ضمن این که بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۴ تعداد ۶۶ مورد کشند قرمز در این منطقه گزارش شده [۸] که ضرورت انجام مطالعه در این خصوص را نشان می‌دهد. از سوابق مطالعاتی پارامترهای بیولوژیک در خلیج فارس و دریای عمان می‌توان به مطالعه مروستی و همکاران، شریف نیا و همکاران، آبرل و همکاران، حمزه‌ای و همکاران که با اندازه‌گیری‌های میدانی یا استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در خلیج فارس و در مواردی با مدل‌سازی در دریای عمان پارامترهای بیولوژیک را مطالعه کرده‌اند، اشاره کرد [۸-۱۱].

خلیج فارس یک حوزه آبی نیمه بسته است و محدوده طول و عرض جغرافیایی آن به ترتیب ۴۸-۵۶/۵ و ۲۴-۳۰ و عمق متوسط آن حدود ۴۰ متر است و از راه تنگه هرمز به دریای عمان وصل می‌شود. با توجه به مقدار تبخیر، بارش و ورودی رودخانه‌های خلیج فارس سالیانه حدود ۴۱۶ کیلومتر مکعب کاهش آب دارد، که با ورود آب‌های سطحی اقیانوس هند (IOSW^۴) از تنگه هرمز جبران می‌شود [۱۲]. گردش آب در خلیج فارس تحت تأثیر عواملی مانند وزش بادهای شمال غربی غالب، نیروهای شناوری، واداشت‌های ترموهالینی^۵، و جزر و مد است که به دو حوزه کوچک مقیاس و متوسط تقسیم می‌شود. گردش اصلی باروتروپیک که شامل یک چرخاب^۶ چرخندی در جنوب شرقی این محوطه آبی است؛ بین ژوئن و اگوست با یک واچرخنده در شمال غربی حوضه همراه می‌شود، و از جولای تا اکتبر نیز جایش را به پیچک‌های کوچک‌تر می‌دهد. گردش آب‌های ساحلی ایران (ICC^۷) با سرعت $20-30 \text{ cm/s}$ در بهار و تابستان نیز از شمال خلیج فارس از تنگه هرمز تا شمال قطر جریان دارد و شامل تعدادی پیچک در مقیاس متوسط با قطری حدود ۱۳۰-۱۱۵ کیلومتر است که گستره عمودی آن‌ها همه عمق آب را در بر می‌گیرد، که به پیچک‌های ساحلی ایران (ICE^۸) معروف‌اند [۱۳]. در دسامبر همان‌طور که باد شدت می‌گیرد لایه‌بندی تضعیف می‌شود، و در زمستان این ساختار جایگزین

معادله باروتروپیک، و از گام‌های زمانی بلندتر برای حل معادله‌های باروکلینیک استفاده می‌شود. در این مدل با گسسته‌سازی زمان و مکان می‌توان معادله‌های حاکم بر یک منطقه را با اعمال شرایط مرزی و اولیه حل کرد. همچنین این مدل توانایی تطبیق شبکه مدل با توپوگرافی منطقه را نیز دارد، و می‌توان از شبکه‌های تودرتو^{۱۴} برای انجام دقیق‌تر محاسبات در یک منطقه در ارتباط با مناطق مجاور آن استفاده کرد. این قابلیت حل شبکه‌بندی تودرتو، می‌تواند با گام‌های زمانی و مکانی موردنیاز هر منطقه، تفاوت محاسبات لازم برای مناطق مختلف ساحلی و دور از ساحل را به‌خوبی تأمین کند و برای مدل کردن چگونگی پاسخ اقیانوس به واداشت‌های فیزیکی جوی مانند تابش، باد، بارش و سیستم‌های اقیانوسی مانند آب‌های تازه^{۱۵}، رسوبات، یخ، مواد مغذی و غیره به کار گرفته شود [۱۹].

اجزای مدل بیولوژیکی: مدل بیولوژیکی استفاده‌شده در این پژوهش مدل بیوفنل ($N_2PChlZD_2$) است که شکلی از چرخه نیتروژن در حوزه‌های آبی است و شامل هفت متغیر حالت فیتوپلانکتون (Phy)، زئوپلانکتون (Zoo)، نترات (NO_3)، آمونیوم (NH_4)، کلروفیل (Chl-a)، دترایتوس کوچک (SDet) و دترایتوس بزرگ (LDet) با روابط نمادین شکل ۱ است [۴].



شکل ۱. نمای بیولوژیک مدل فنل [۴]

در شکل ۱، خطوط بین متغیرها، نشانگر فرایندهایی است که این متغیرها را به یکدیگر ارتباط می‌دهند. کلروفیل با دریافت نور خورشید در لایه نوری آب، جذب کربن و انجام فتوسنتز باعث تثبیت شیمیایی کربن می‌شود و اکسیژن آزاد می‌کند

ساختارهای کوچک می‌شود و جریان‌های موجود در این زمان بیشتر از الگوی بادها تأثیر می‌گیرند. در این زمان گردش سطحی در بخش شمال غربی خلیج فارس تحت تأثیر باد و خروجی رودخانه‌های منطقه است که جریان‌هایی را در جنوب شرقی در طول سواحل ایران و کشورهای عربی پیش می‌برند، و یک فراچاه^۹ در طول ساحل ایران و یک فروچاه^{۱۰} در طول ساحل کشورهای عربی منطقه ایجاد می‌کنند، که متوسط سرعت جریان‌های ماهانه این مناطق به $10-20\text{cm/s}$ می‌رسد [۱۴]. البته مطالعات دینامیکی زیادی در منطقه انجام شده که از آن میان می‌توان به مطالعات عظام و همکاران، بیدختی و عظام، یائو و جونز، پاوس و همکاران و موارد متعدد دیگری اشاره کرد [۱۵-۱۸].

بنابراین با توجه به اهمیت خلیج فارس از نظر سیستم‌های اکولوژیکی، جغرافیایی و عدم پژوهش کافی در مورد پارامترهای بیولوژیکی این منطقه انجام تحقیقی جامع در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس در این پژوهش سعی شده که با استفاده از ROMS^{۱۱} و به‌کارگیری یک مدل جفت شده فیزیکی-بیولوژیکی تغییرات فصلی پارامترهای بیولوژیکی خلیج فارس شبیه‌سازی و بررسی شود که بخش‌های مختلف این مطالعه به شرح ذیل ارائه شده است. ابتدا ضمن معرفی مختصر مدل عددی ROMS، جزئیات لازم و معادله‌های بیولوژیکی استفاده‌شده به‌اختصار آورده شده است و به دنبال آن روش آماده‌سازی مدل برای منطقه مورد مطالعه و نتایج اجرا موردبحث و بررسی قرار گرفته است.

۲. تئوری و محاسبات

مدل فیزیکی-اکولوژیکی رامز (ROMS)، یک مدل گردش اقیانوسی بر پایه حل معادله‌های اولیه هیدروستاتیکی سطح آزاد، با الگوریتم‌های محاسباتی کرنل نسل جدید است که به‌طور خاص برای شبیه‌سازی‌های دقیق از سیستم‌های منطقه‌ای اقیانوسی طراحی شده است. در این مدل با بهره‌گیری از روش تفکیک مد^{۱۲}، با روش محاسباتی مبتنی بر توپوگرافی^{۱۳}، از گام‌های زمانی کوتاه برای محاسبات عددی

$$L_{NO3} = \frac{NO3}{NO3 + K_{NO3}} \cdot \frac{K_{NH4}}{NH4 + K_{NH4}} \quad (5)$$

روابط L_{NO3} و L_{NH4} در اینجا با استفاده از توابع میکائیل منتن^{۱۶} برای نیترات و آمونیوم بیان شده است [۲۱] و به شکلی محدودیت جذب نوع مواد مغذی را بیان می‌کند؛ فرض شده که یک بازدارندگی جذب نیترات در حضور آمونیوم وجود دارد که بر اساس رابطه پارکر [۲۲] است. جمله‌های K_{NO3} و K_{NH4} به ترتیب ضرایب غلظت نیمه اشباع برای جذب آمونیوم و نیترات هستند. همچنین با توجه به اینکه شدت نور در ستون آب به طور نمایی با عمق (Z) کاهش می‌یابد، رابطه آن به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$I = I_0(Z) \\ = I_0 \cdot PAR \cdot \exp \left\{ -Z(K_w + K_{chl} \int_z^0 Ch(\zeta) d\zeta) \right\} \quad (6)$$

I_0 مقدار شدت نور درست زیر سطح آب است، که مقدار آن با عرض جغرافیایی و طول روز در هر فصل از سال تعیین می‌شود. PAR^{17} (تابش فعال فتوسنتزی) درست زیر سطح آب نیز تابعی از نور در دسترس برای فتوسنتز است. K_w و K_{chl} نیز ضرایب تضعیف نور در ستون آب، به ترتیب برای آب و کلروفیل آ هستند و با تغییر عمق ثابت فرض شده‌اند [۲۳].

تابع $f(I)$ نیز بر حسب شیب منحنی شدت تابش نور و مقدار فیتوپلانکتون (P-I) بیان می‌شود که در آن α شیب اولیه منحنی (P-I) است [۲۴].

$$f(I) = \frac{\alpha \cdot I}{\sqrt{\mu_{max}^2 + \alpha^2 \cdot I^2}} \quad (7)$$

$$g = g_{max} \frac{Phy^2}{K_p + Phy^2} \quad (8)$$

که g_{max} نرخ بیشینگی تغذیه زئوپلانکتون‌ها از فیتوپلانکتون‌ها و K_p غلظت نیمه اشباع در این تغذیه است. جمله‌های دیگری که کاهش تعداد فیتوپلانکتون‌ها را نمایش می‌دهند، شامل ضریب مرگ و میر آن‌ها با نرخ خطی (m_p)، ضریب تجمع یا متراکم شدن فیتوپلانکتون‌ها و دترایتوس‌های کوچک به صورت دترایتوس بزرگ (τ)، و ته‌نشین شدن آن‌ها در ستون آب (w_p) است. فرض شده که ذرات

(تبدیل و قابل مصرف شدن کربن دریافتی از اتمسفر به شکل مواد آلی قابل مصرف پلانکتون‌ها و تولید اولیه)، که مقدار این تولید اولیه با نور، دما و مواد مغذی محدود می‌شود. زئوپلانکتون‌ها، ضمن انتقال انرژی در ساختار غذایی اکوسیستم آب از فیتوپلانکتون‌ها تغذیه می‌کنند. بخشی از بقایای فیتوپلانکتون‌ها، زئوپلانکتون‌ها و مواد حاصل از دفع، مرگ و میر یا مواد خرده‌ریز باقی مانده از تغذیه زئوپلانکتون‌ها به اعماق آب‌ها ته‌نشین می‌شوند (دترایتوس). بخشی از دترایتوس‌های کوچک با پیوستن به هم دترایتوس‌های بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند. دترایتوس‌ها به وسیله باکتری‌ها تجزیه و باعث بازتولید مواد نیتروژن دار غیر آلی قابل استفاده برای تولید مجدد می‌شوند [۳]. رابطه‌های ریاضی استفاده شده در این مدل نیز به شرح زیر است.

فیتوپلانکتون: نرخ تغییرات زمانی فیتوپلانکتون بر اساس نرخ رشد، ته‌نشین شدن، نرخ مرگ و میر، و مقدار مصرف آن‌ها توسط زئوپلانکتون‌ها به شکل زیر داده شده است:

$$\frac{\partial Phy}{\partial t} = \mu \cdot Phy - g \cdot Zoo - m_p \cdot Phy \\ - \tau(SDet + Phy)Phy - W_p \frac{\partial Phy}{\partial z} \quad (1)$$

در این رابطه g نرخ تغذیه زئوپلانکتون‌ها از فیتوپلانکتون، m_p نرخ مرگ و میر فیتوپلانکتون‌ها، τ نرخ تجمع دترایتوس‌ها، W_p نرخ ته‌نشینی و μ نرخ رشد فیتوپلانکتون و مقدار آن وابسته به دما و بر اساس رابطه اپلی به شکل زیر است [۲۰]:

$$\mu_{max} = \mu_{max}(T) = \mu_0 \cdot 1.066^T \quad (2)$$

μ_0 نرخ رشد فیتوپلانکتون در دمای صفر درجه سانتی‌گراد است و واحد آن day^{-1} است. علاوه بر این، نرخ رشد به مقدار تابش دریافتی از سوی کلروفیل و فیتوپلانکتون، و رابطه‌ای که محدودیت جذب نیترات و آمونیوم به وسیله فیتوپلانکتون را نشان می‌دهد، وابسته است:

$$\mu = f(I) \cdot ((L_{NO3} + L_{NH4})) \quad (3)$$

$$L_{NH4} = \frac{NH4}{NH4 + K_{NH4}} \quad (4)$$

این اتفاق متناسب با مربع توده زیستی زئوپلانکتون است. K_p نیز غلظت نیمه اشباع مصرف فیتوپلانکتون‌ها توسط زئوپلانکتون‌هاست [۴].

دترایتوس کوچک و بزرگ: دترایتوس‌ها به موادی گفته می‌شود که از ته‌نشین شدن مواد دفع شده زئوپلانکتون‌ها، مواد ناشی از مرگ و میر فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها، بقایای تغذیه زئوپلانکتون‌ها و مواد آلی محلول در آب حاصل می‌شوند که بخش بزرگی از آن‌ها تجزیه شده و دوباره به شکل مواد معدنی محلول در آب به چرخه مواد مغذی مورد نیاز برای تولید اولیه برمی‌گردند. رابطه تغییرات دترایتوس‌ها به شکل زیر است:

$$\frac{\partial SDet}{\partial t} = g(1 - \beta) \cdot Zoo + m_z \cdot Zoo^2 + m_p \cdot Phy - \tau(SDet + Phy)SDet - r_{SD} \cdot SDet - W_S \frac{\partial SDet}{\partial z} \quad (12)$$

$$\frac{\partial LDet}{\partial t} = \tau(SDet + Phy^2) - r_{LD} \cdot LDet - W_L \frac{\partial LDet}{\partial z} \quad (13)$$

در اینجا r_{LD} و r_{SD} به ترتیب نرخ‌های معدنی شدن برای دترایتوس‌های کوچک و بزرگ است. همچنین W_L و W_S به ترتیب سرعت‌های ته‌نشین شدن دترایتوس‌های کوچک و بزرگ است.

نیترات و آمونیوم: رابطه تغییرات نیترات و آمونیوم بر اساس فرایندهای بیولوژیکی آن‌ها به صورت زیر است:

$$\frac{\partial NO_3}{\partial t} = -\mu_{max} \cdot f(I) \cdot L_{NO_3} \cdot Phy + n \cdot NH_4 \quad (14)$$

جمله اول معادله (۱۴) کاهش NO_3 ناشی از تغذیه فیتوپلانکتون‌ها را نشان می‌دهد و در جمله دوم فرض شده است که بخشی از آمونیوم با نرخ n نیتراته شده و به منبع NO_3 آب اضافه می‌شود.

$$\frac{\partial NH_4}{\partial t} = -\mu_{max} \cdot f(I) \cdot L_{NH_4} \cdot Phy - n \cdot NH_4 + L_{BM} \cdot Zoo + L_E \frac{Phy^2}{K_p + Phy^2} \beta \cdot Zoo + r_{SD} \cdot SDet + r_{LD} \cdot LDet \quad (15)$$

دترایتوس کوچک (SDet) کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر و فیتوپلانکتون‌ها (Phy) متراکم می‌شوند و یک ذره دترایتوس بزرگ (LDet) را تشکیل می‌دهند. همچنین در جمله آخر رابطه (۱) تغییرات فیتوپلانکتون‌ها را در ستون آب نشان می‌دهد و W_p یعنی سرعت ته‌نشین شدن فیتوپلانکتون‌ها نیز ثابت فرض شده است.

کلروفیل: رابطه کلروفیل توده زیستی و فیتوپلانکتون رابطه‌ای غیرخطی است، چون میزان کلروفیل موجود در سلول فیتوپلانکتون با مقدار تابش فعال فتوسنتزی و مقدار مواد مغذی در دسترس برای سازگاری با محیط تغییر می‌کند [۲۵].

$$\frac{\partial Chl}{\partial t} = \rho_{Chl} \cdot \mu \cdot Chl - g \cdot Zoo \frac{Chl}{Phy} - m_p \cdot Chl - \tau(SDet + Phy)Chl \quad (9)$$

$$\rho_{Chl} = \frac{\theta_{max} \cdot \mu \cdot Phy}{\alpha \cdot I \cdot Chl} \quad (10)$$

θ_{max} حداکثر نسبت کلروفیل موجود در توده زیستی فیتوپلانکتون است و کسر $\frac{\mu \cdot Phy}{\alpha \cdot I \cdot Chl}$ نیز با نسبت حداکثر پتانسیل فتوسنتز متناسب است [۲۶].

زئوپلانکتون: در این مدل از تنوع زئوپلانکتون‌ها صرف نظر شده و همه آن‌ها در یک دسته قرار داده شده‌اند. زئوپلانکتون‌ها در این مدل از فیتوپلانکتون‌ها تغذیه می‌کنند و فرض شده که زئوپلانکتون‌ها با ضریب کارایی β این تغذیه را به توده زیستی خود تبدیل کنند و بخش باقی مانده یعنی $1 - \beta$ را به منبع دترایتوس کوچک منتقل نمایند:

$$\frac{\partial Zoo}{\partial t} = g \cdot \beta \cdot Zoo - L_{BM} \cdot Zoo - L_E \frac{Phy^2}{K_p + Phy^2} \cdot \beta - m_z \cdot Zoo^2 \quad (11)$$

سایر جمله‌های رابطه (۱۱) مربوط به کاهش زئوپلانکتون است که شامل مرگ و میر و دفع آن‌ها و دو شکل دفع به صورت آمونیوم ناشی از سوخت و ساز زئوپلانکتون‌ها و دفع ناشی از تغذیه است که به ترتیب با نرخ‌های خطی L_E و L_{BM} نمایش داده شده است. جمله مربوط به مرگ و میر نیز که به شکل $m_z \cdot Zoo^2$ است، شامل از بین رفتن طبیعی، شکار شدن یا هر شکل دیگر کاهش تعداد است و فرض شده که

$$n = n_{max} \left\{ 1 - \max \left(0, \frac{I - I_0}{K_I + I - I_0} \right) \right\} \quad (16)$$

نیترا ته شدن با نور مهار می شود و در شدت نور غیر صفر به سطح حداقل مهار می رسد و n_{max} بیشینه نرخ نیتریفیکاسیون است [۲۷] و فرض شده که این مقدار تا صفر در شدت نور زیاد کاهش می یابد. K_I و I_0 نیز به ترتیب مقدار شدت نور مهار نیمه اشباع، و شدت نور آستانه مهار است. جدول زیر ضرایب پارامترهای بیولوژیکی استفاده شده در مدل را نشان می دهد که برای اطلاعات بیشتر می توان به فنل [۴] مراجعه نمود.

دو جمله اول معادله (۱۵) به ترتیب تغذیه فیتوپلانکتون ها از آمونیوم و کاهش میزان آمونیوم در اثر نیترافیکاسیون را نشان می دهد. جمله دوم و سوم جمله های مربوط به دفع آمونیوم توسط زئوپلانکتونها ناشی از تغذیه یا سوخت و ساز آنهاست. دو جمله آخر هم مربوط به تجزیه دترایتوس ها و غیر آلی شدن آنها با نرخ r_{SD} و r_{LD} است.

از فرایندهایی که دترایتوس ها طی می کنند، تجزیه و اضافه شدن آنها به منبع آمونیوم موجود و فرایند نیترا ته شدن (نیترافیکاسیون) است که نیتروژن موجود در این مواد آلی را به نیترا ت تبدیل می کند. در اینجا نرخ نیتریفیکاسیون n با رابطه زیر بیان شده است:

جدول ۱. پارامترهای مدل بیولوژیک

نماد	پارامتر	مقدار	واحد
μ_0	نرخ رشد فیتوپلانکتون در صفر درجه سانتی گراد	۲/۹	d^{-1}
K_{NO3}	غلظت نیمه اشباع برای جذب فیتوپلانکتونی نیترا ت	۰/۵	$mmolNm^{-3}$
K_{NH4}	غلظت نیمه اشباع برای جذب فیتوپلانکتونی آمونیوم	۰/۵	$mmolNm^{-3}$
α	شیب اولیه منحنی P-I	۰/۰۲۵	$(Wm^{-2}d)^{-1}$
g_{max}	نرخ حداکثر تغذیه	۰/۶	$d^{-1}mmolNm^{-3}$
K_p	غلظت نیمه اشباع جذب فیتوپلانکتون	۲	$(mmolNm^{-3})^2$
m_p	نرخ مرگ و میر فیتوپلانکتون	۰/۱۵	d^{-1}
τ	ضریب تجمع	۰/۰۰۵	$d^{-1}(mmolNm^{-3})^{-1}$
θ_{max}	حداکثر نسبت کلروفیل آ به فیتوپلانکتون	۰/۰۵۳	$mgChl(mgC)^{-1}$
β	ضریب کارایی جذب	۰/۷۵	بدون واحد
L_{BM}	نرخ دفع بر اساس متابولیسم زئوپلانکتون	۰/۱	d^{-1}
L_E	حداکثر نرخ جذب مربوط به دفع	۰/۱	d^{-1}
m_z	نرخ مرگ و میر زئوپلانکتون	۰/۰۲۵	$d^{-1}(mmolNm^{-3})^{-1}$
r_{SD}	نرخ معدنی شدن دترایتوس کوچک	۰/۰۳	d^{-1}
r_{LD}	نرخ معدنی شدن دترایتوس بزرگ	۰/۰۱	d^{-1}
n_{max}	حداکثر نیتریفیکاسیون	۰/۰۵	d^{-1}
K_I	شدت نوری بازدارندگی نیمه اشباع نیتریفیکاسیون	۰/۰۱	Wm^{-2}
I_0	آستانه بازدارندگی نور برای نیترا ته شدن	۰/۰۰۹۵	Wm^{-2}

نماد	پارامتر	مقدار	واحد
W_p	سرعت ته‌نشین شدن فیتوپلانکتون	۰/۱	md^{-1}
W_{SDet}	سرعت ته‌نشین شدن دترایتوس کوچک	۰/۱	md^{-1}
W_{LDet}	سرعت ته‌نشین شدن دترایتوس بزرگ	۱	md^{-1}

اطمینان از شبه مانا شدن نتایج، اجرای مدل در یک بازه زمانی ده‌ساله تکرار شده است [۳۳]. در این مطالعه برای صحت‌سنجی و مقایسه نتایج، مقدار کلروفیل سطحی جهانی با دقت تفکیک ۴ کیلومتر از آرشیو GMIS دریافت شد و پس از انجام تصحیحات لازم و درون‌یابی، مقادیر مربوط به حوزه مورد مطالعه از آن استخراج و مورد استفاده قرار گرفت.

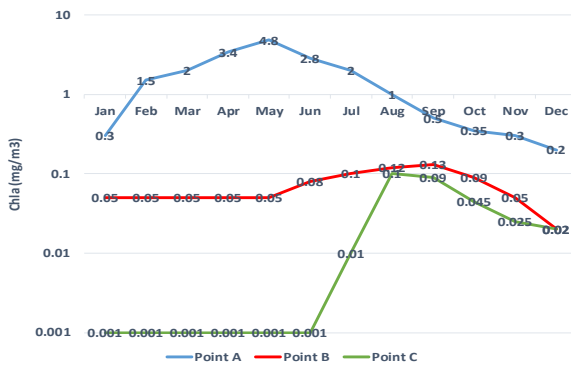
۳. یافته‌ها

نتایج اجرای مدل به صورت شکل‌ها و سری‌های زمانی مربوط به پارامترهای دینامیکی و بیولوژیکی مدل است که در اینجا برای اختصار، نتایج مربوط به الگوی توزیع سطحی متغیرهای حالت مدل در ماه سپتامبر که پیک شکوفایی فیتوپلانکتونی و ماه دسامبر که تولید اولیه رو به افول می‌رود مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سری‌های زمانی سه نقطه از خلیج فارس واقع در شمال غربی (A) به مختصات $52.5 E-25 N$ و $48.5 E-29.5 N$ ، جنوب (B) به مختصات $55.3 E-26.7 N$ و $51 E-27 N$ تا $49.5 E-29 N$ با مقطعی مجاورت جزیره قشم (C) به مختصات $51 E-27 N$ تا $49.5 E-29 N$ در امتداد محور خلیج فارس برای بحث آورده شده است (شکل ۲). برای شروع بحث در خصوص نتایج ابتدا به تصاویر شکل ۳ مربوط به الگوی تغییرات ماهانه کلروفیل در ماه‌های سپتامبر و دسامبر پرداخته می‌شود.

تصویر مربوط به ماه سپتامبر، شکل ۳، نشان می‌دهد که رشد کلروفیل آ، از سواحل شمال غربی و در بهار آغاز می‌شود و از آگوست تا اواخر پاییز در امتداد سواحل جنوبی و مرکز خلیج فارس گسترش می‌یابد و همان‌طور که در تصویر مربوط به ماه دسامبر دیده می‌شود، از اواخر پاییز و در زمستان به سرعت کاهش می‌یابد. شکل ۴ که توزیع افقی مقدار کلروفیل را در نقاط مختلف خلیج فارس به نمایش می‌گذارد، نشان می‌دهد که در نقاط انتخابی پیک مقدار کلروفیل آ در

آماده‌سازی مدل: منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر محدوده خلیج فارس با دو مرز باز آبی شرقی و جنوبی واقع در شمال اقیانوس هند است. به منظور اعمال همه متغیرهای فیزیکی و بیولوژیکی روی شبکه قائم مرزهای باز مدل از داده‌های آرشیو اقلیمی WOA09^{۱۸} استفاده شده است. همچنین از این مجموعه داده‌ها برای تخمین شرایط اولیه حل عددی روی شبکه سه‌بعدی حل، استفاده شده است. در مرزهای خشکی جانبی، شارهای جرم، اندازه حرکت، گرما، شوری و تلاطم صفر در نظر گرفته می‌شود و شرط مرزی در نظر گرفته شده برای مرزهای باز از نوع تابشی و لایه اسفنجی است [۲۸]. دلیل انتخاب مکان مرزهای باز در ناحیه شمالی اقیانوس هند، کیفیت بهتر آرشیوهای جهانی اقیانوسی مانند WOA09 در این مناطق، در مقایسه با دریاها و حاشیه‌ای است؛ زیرا تعداد اندازه‌گیری‌هایی که در جامعه آماری و تهیه این مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (به‌ویژه متغیرهای بیولوژیکی)، در مناطق اقیانوسی بیشتر بوده و اعتبار بیشتری دارد.

در این مطالعه مشخصات هندسی منطقه از آرشیو اطلاعات توپوگرافی جهانی زمین ETOPO1 استخراج و روی شبکه حل عددی درون‌یابی شد [۲۹]. تفکیک‌پذیری شبکه افقی 1:20 درجه با ابعاد تقریبی ۴/۹۹ کیلومتر (کمتر از شعاع تغییر شکل راسبی) [۳۰]، و در راستای قائم با استفاده از دستگاه مختصات سیگما با پانزده تراز شبکه‌بندی شده است. گام زمانی با شرط کورانت (CFL)^{۱۹} تعیین و بر اساس آن در این مطالعه گام زمانی برای مد باروکلینیک ۷۲۰ ثانیه و برای مد باروتروپیک ۶۰ ثانیه و طرح‌واره تلاطمی بستار ۲/۵ ملور و یامادا^{۲۰} [۳۱] در نظر گرفته شده است. بعلاوه به منظور اعمال نیروهای واداشت جوی در سطح مدل از داده‌های آرشیو جهانی اقلیمی COADS^{۲۱} استفاده شده است [۳۲]. شبیه‌سازی مدل با استفاده از داده‌های اقلیمی^{۲۲} (میانگین ماهانه) و برای

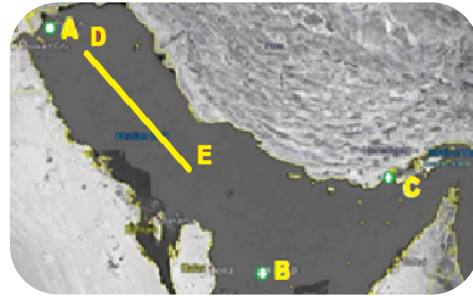


شکل ۴. تغییرات ماهانه کلروفیل آ در سه نقطه انتخابی شمال غربی، میانی و شمال شرقی خلیج فارس (52.5 E-25 N و 48.5 E-29.5 N و 55.3 E-26.7 N)

شکل ۵، توزیع قائم کلروفیل آ با عمق و اثر پیچک‌های منطقه بر آن‌ها را در ماه‌های سپتامبر و دسامبر نشان می‌دهد. در ماه سپتامبر به علت جریان‌های موجود و افزایش عمق لایه آمیخته و انتقال مواد مغذی از بستر به لایه نوری، رشد و توزیع کلروفیل در منطقه حضور پیچک‌ها تا عمق ۳۰-۲۰ متری دیده می‌شود، در صورتی که در دسامبر با تضعیف فعالیت پیچک‌ها رشد کلروفیل آن نیز خاموش می‌شود. تغییرات مقدار کلروفیل آ، در کل منطقه تحت تأثیر انتقال مواد مغذی لازم برای تولید اولیه از عمق به سطح در اثر جریان‌ها موجود منطقه است؛ به همین دلیل است که به انتقال عمودی مواد مغذی توسط پیچک‌ها و فراچاه‌ها توجه خاص می‌شود. در شکل ۵، اثر حضور دو پیچک فعال در ماه سپتامبر در این منطقه کاملاً مشهود است، که در شکل ۱۳ در مورد اثر جریان‌ها بر تولید اولیه بحث شده است. اثر تغییرات افقی ماهانه کلروفیل منطقه نیز با انتخاب سه نقطه توضیح داده شده و بررسی شده است، که تفاوت در مقدار و زمان پیک این سه نقطه به عنوان نماینده‌ای از تغییرات فصلی آن مناطق در نظر گرفته شده است که شکل ۴ آن را نشان می‌دهد.

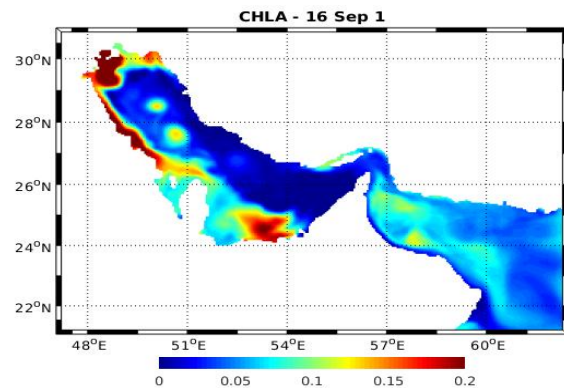
شکل ۶، مربوط به تصاویر تغییرات ماهانه فیتوپلانکتون در ماه‌های سپتامبر و دسامبر است. چون کلروفیل آ، به عنوان جانشینی برای بررسی تولید اولیه فیتوپلانکتونی است؛ بنابراین باید الگوی تغییرات فیتوپلانکتون‌ها شباهت کاملی با الگوی تغییرات ماهانه کلروفیل آ داشته باشند، که این مطابقت در شکل ۶ به خوبی معلوم است. این شکل نشان می‌دهد که در

بخش شمال غربی در ابتدای بهار، و در بخش‌های مرکزی و تنگه هرمز در اواخر تابستان و اوایل پاییز رخ می‌دهد. همچنین تفاوت زیاد در پیک مقدار کلروفیل آ در منطقه ساحلی شمال غربی (بیش از 4 mgChlm^{-3}) در مقایسه با مناطق جنوبی خلیج فارس (حدود 0.25 mgChlm^{-3}) و شمال جزیره قشم (حدود 0.12 mgChlm^{-3}) نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

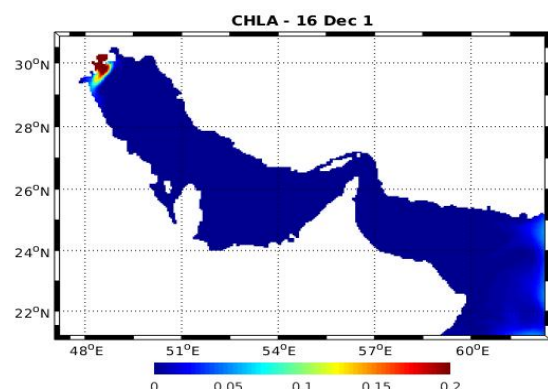


شکل ۲. مکان نقاط A و B و C و برش عمودی DC انتخابی بر روی نقشه خلیج فارس

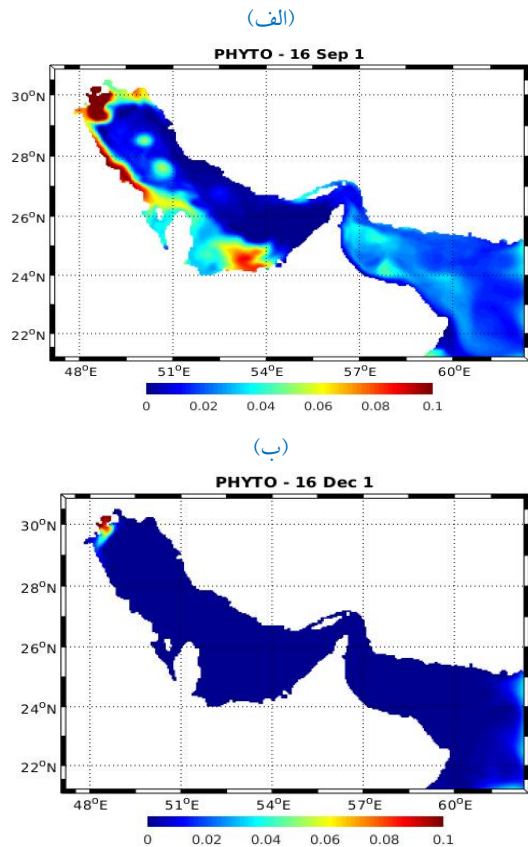
(الف)



(ب)



شکل ۳. الگوی توزیع ماهانه کلروفیل آ در خلیج فارس و دریای عمان در ماه سپتامبر (الف) و ماه دسامبر (ب)، محور افقی و عمودی به ترتیب طول و عرض جغرافیایی، و نوار رنگی مقدار کلروفیل بر حسب mgChlam^{-3} است.

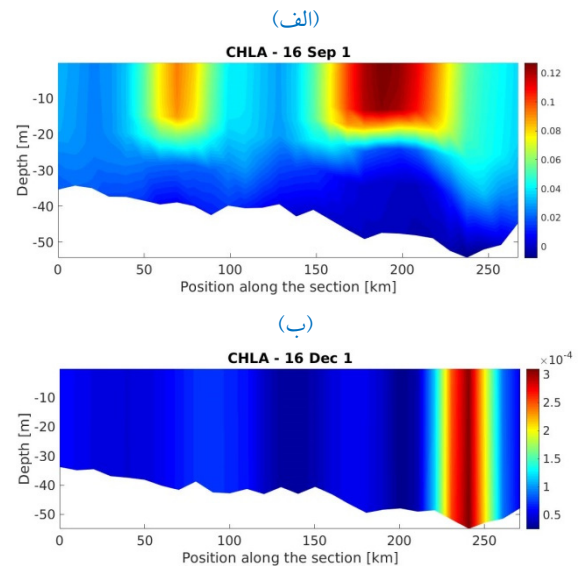


شکل ۶. الگوی توزیع ماهانه کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان در ماه سپتامبر (الف) و ماه دسامبر (ب)، محور افقی و عمودی به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و نوار رنگی مقدار فیتوپلانکتون برحسب mmolNm^{-3} است.

در شکل ۸ توزیع مقدار و پیک و وقوع شکوفایی فیتوپلانکتونی در سه نقطه انتخابی شمال غربی، میانه و شرق خلیج فارس دیده می‌شود. این مقدار برای این مناطق به ترتیب $1/4$ ، $0/99$ و $0/35$ پیک و وقوع آن‌ها، به ترتیب ماه‌های آوریل و آگوست است.

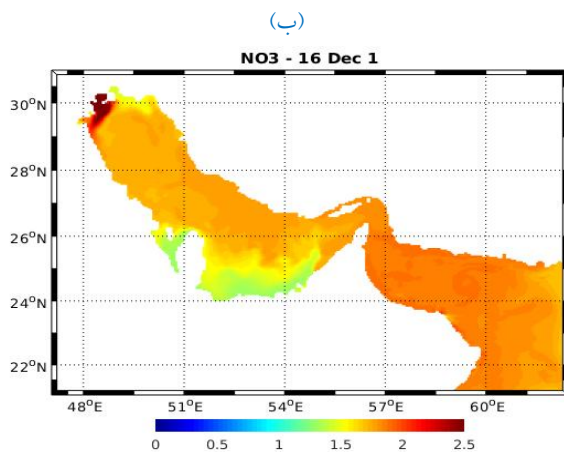
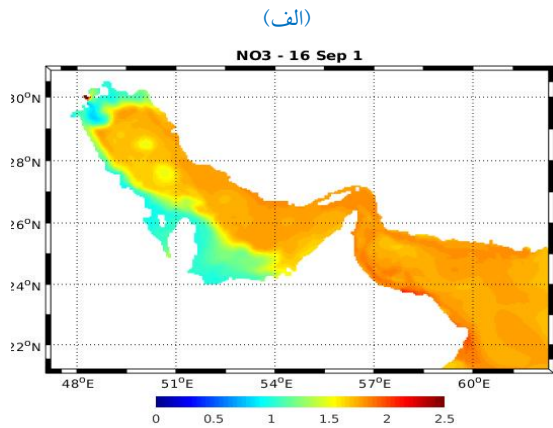
در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب الگوی تغییرات ماهانه نیترات، مقایسه توزیع قائم آن در ماه‌های سپتامبر و دسامبر در منطقه انتخابی و سری زمانی نیترات در سه نقطه انتخاب شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، در تمام مناطق الگوی توزیع و مقدار نیترات با الگو و مقدار کلروفیل آ رابطه معکوس دارد که حاکی از این است که در مناطقی که تولید اولیه بیشتری اتفاق افتاده به دلیل مصرف نیترات برای تولید فیتوپلانکتونی مقدار آن در آن مناطق کاهش یافته است.

ماه سپتامبر با فعالیت پیچک‌های منطقه رشد فیتوپلانکتونی در محلی که مواد مغذی توسط پیچک‌ها به منطقه نوری آورده شده، افزایش یافته و در ماه دسامبر با آرام شدن جریان‌های منطقه مقدار فیتوپلانکتون‌ها رو به کاهش رفته است.

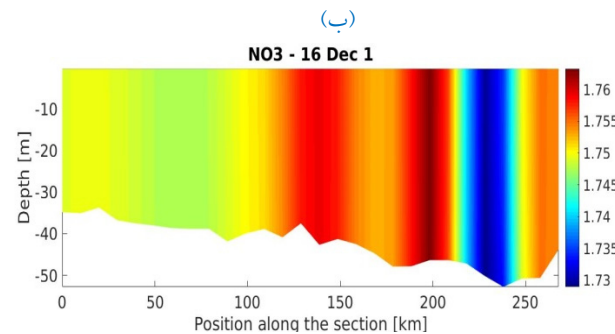
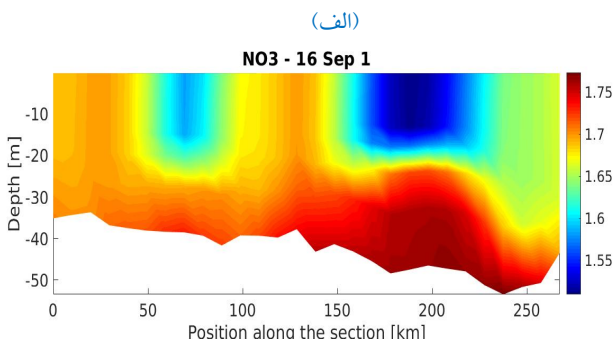


شکل ۷. توزیع عمودی کلروفیل آ در ماه سپتامبر (الف) و ماه دسامبر (ب) در مقطع انتخابی (27°N – 29°N ، 51°E – $49/5^{\circ}\text{E}$)، محورهای افقی و عمودی به ترتیب مکان جغرافیایی مقطع انتخابی و عمق را نشان می‌دهند.

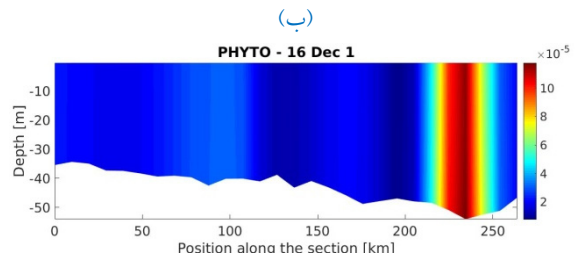
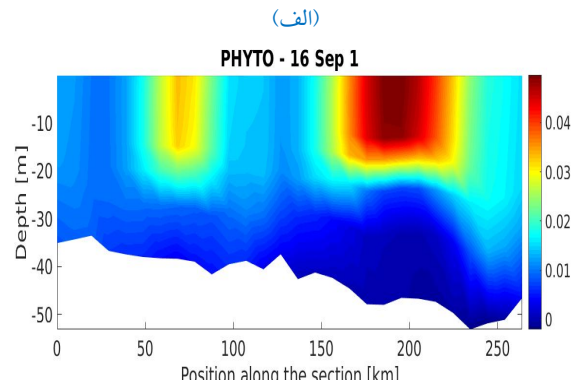
در شکل ۷ مقدار و الگوی توزیع قائم فیتوپلانکتون در مقطع انتخابی در ماه‌های سپتامبر و دسامبر دیده می‌شود و حاکی از این است که در ماه سپتامبر با حضور پیچک‌های منطقه تولید فیتوپلانکتونی تا عمق ۲۰ تا ۳۰ متری نیز اتفاق می‌افتد، در صورتی که در ماه دسامبر با تضعیف جریان‌ات این رشد متوقف می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که حداکثر مقدار فیتوپلانکتون‌ها در محل پیچک‌ها تا $0/04 \text{ mmolNm}^{-3}$ در ماه سپتامبر نیز می‌رسد، در صورتی که در ماه دسامبر تقریباً صفر می‌شود. مقایسه شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهد که الگوی توزیع ماهانه و منطقه‌ای فیتوپلانکتون‌ها کاملاً شبیه الگوی توزیع کلروفیل بوده که نتیجه قابل انتظاری است.



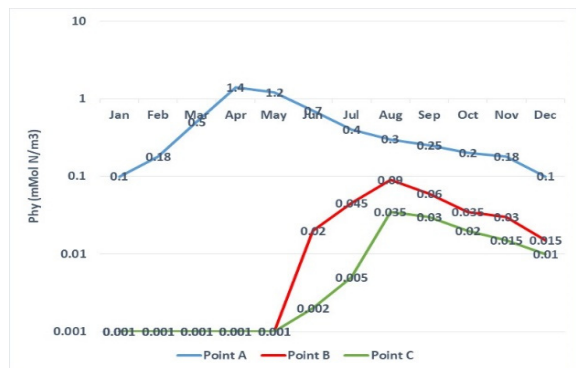
شکل ۹. الگوی توزیع ماهانه نیترات در خلیج فارس و دریای عمان در ماه سپتامبر (الف) و ماه دسامبر (ب)، محور افقی و عمودی به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و نوار رنگی مقدار نیترات بر حسب mmolNm^{-3} است.



شکل ۱۰. توزیع عمودی نیترات در ماههای سپتامبر (الف) و دسامبر (ب) در مقطع انتخابی (۲۹-۲۷N ، ۴۹/۵-۵۱E)



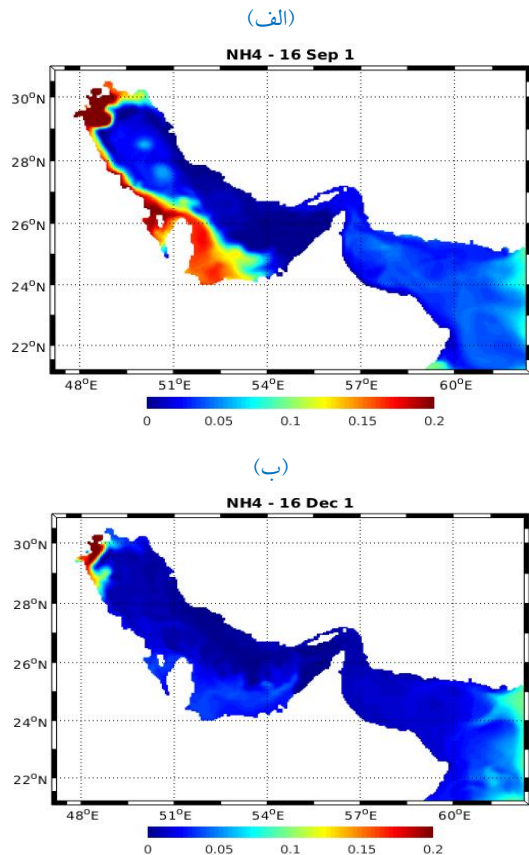
شکل ۷. توزیع عمودی فیتوپلانکتون‌ها در ماه سپتامبر (الف) و ماه دسامبر (ب) در مقطع انتخابی (۲۹-۲۷N ، ۴۹/۵-۵۱E)، محورهای افقی و عمودی به ترتیب مکان جغرافیایی مقطع انتخابی و عمق را نشان می‌دهند.



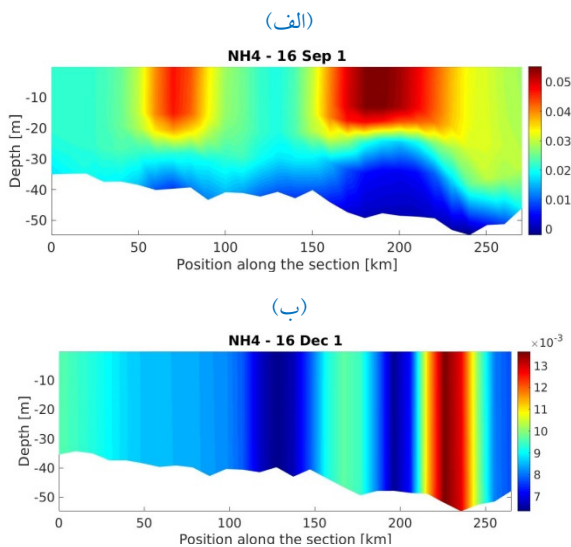
شکل ۸. تغییرات ماهانه فیتوپلانکتون‌ها در سه نقطه انتخابی شمال غربی، میانی و شمال شرقی (۵۲.۵ E-26.7 و 48.5 E-29.5 N و 55.3 E-26.7 N) خلیج فارس که تفاوت مقدار و زمان حداکثر شکوفایی در این سه نقطه را نشان می‌دهد.

در تصویر مربوط به ماه سپتامبر شکل ۱۰ دیده می‌شود که بیشترین میزان نیترات در بستر و کمترین مقدار آن در ناحیه‌ای است که تولید فیتوپلانکتونی اتفاق افتاده و نیترات آن مصرف شده است. باز هم این تصویر اهمیت جریان‌ها، پیچک‌ها و فراچاهایی را نشان می‌دهد که مواد مغذی را از بستر به منطقه نوری آورده و افزایش تولید اولیه از طریق فتوسنتز را با حضور مواد مغذی بیشتر باعث می‌شوند.

در سپتامبر با حضور ادی‌های منطقه و در دسامبر در زمان آرامش نسبی منطقه در شکل ۱۳ به خوبی مشخص است.

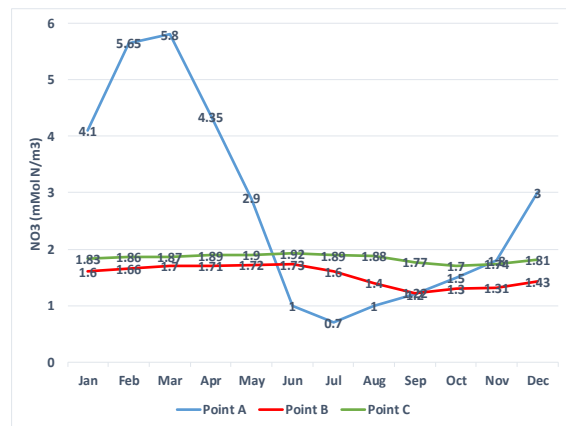


شکل ۱۲. الگوی توزیع ماهانه آمونیوم در خلیج فارس و دریای عمان در ماه‌های سپتامبر (الف) و دسامبر (ب)، محور افقی و عمودی به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و نوار رنگی مقدار آمونیوم بر حسب mmolNm^{-3} است.



شکل ۱۳. توزیع عمودی آمونیوم در ماه‌های سپتامبر (الف) و دسامبر (ب) در مقطع انتخابی (۲۹-۲۷N، ۴۹/۵-۵۱E)

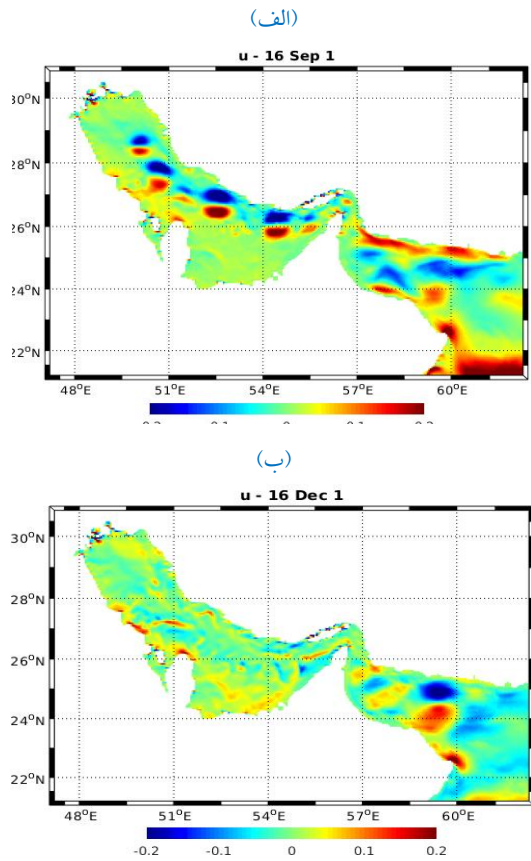
شکل ۱۱ مربوط به توزیع افقی نترات در سه نقطه انتخابی است که در اواخر پاییز و زمستان، مقدار نترات در سواحل شمال غربی خلیج فارس (۲۹/۵N-۴۸/۵E) حداکثر مقدار سالانه خود را دارد (حدود 6 mol N m^{-3}) و از اوایل تابستان با افزایش تولید اولیه مقدار آن به سرعت کاهش می‌یابد. در مرکز خلیج فارس (۲۵N-۵۴E) و شمال جزیره قشم (۲۷N-۵۶/۵E) این مقدار حدود 2 mol N m^{-3} است که تولید اولیه کمتری را نیز به همراه دارد.



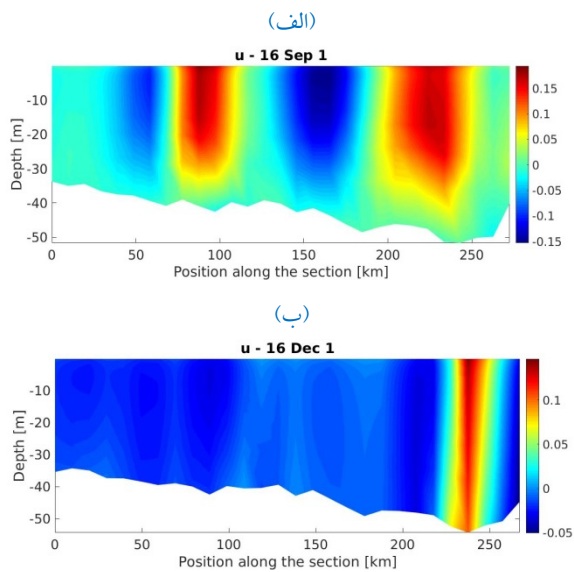
شکل ۱۱. تغییرات ماهانه نترات در سه نقطه انتخابی شمال غربی، میانی و شمال شرقی (۵۵.۳ E - ۲۶.۷ N و ۵۲.۵ E - ۲۵ N و ۴۸.۵ E-۲۹.۵ N) خلیج فارس

در شکل ۱۲ توزیع ماهانه آمونیوم در ماه‌های سپتامبر و دسامبر آورده شده است و چون آمونیوم بیشتر محصول دفع زئوپلانکتون‌ها و تجزیه دترایتوس‌هاست، الگوی توزیع آن شبیه الگوی توزیع فیتوپلانکتون‌هاست. در مناطق و زمان‌هایی که تولید فیتوپلانکتونی زیاد است مقدار آمونیوم افزایش می‌یابد و در زمان افول تولید اولیه فیتوپلانکتونی مقدارش کم می‌شود.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز به ترتیب مربوط به الگوی توزیع عمودی آمونیوم در مقطع انتخابی در ماه‌های سپتامبر و دسامبر، و نمودارهای سری زمانی تغییرات ماهانه آمونیوم در سه نقطه انتخابی است. نمودارها حداکثر مقدار آمونیوم را از حدود 0.6 mmolNm^{-3} در نقطه واقع در شمال غربی خلیج فارس تا حدود 0.2 mmolNm^{-3} در دو نقطه انتخابی دیگر، همراه با اختلاف زمانی پیک آن‌ها نشان می‌دهد. همچنین تبعیت الگوی توزیع قائم آمونیوم با جریانات منطقه

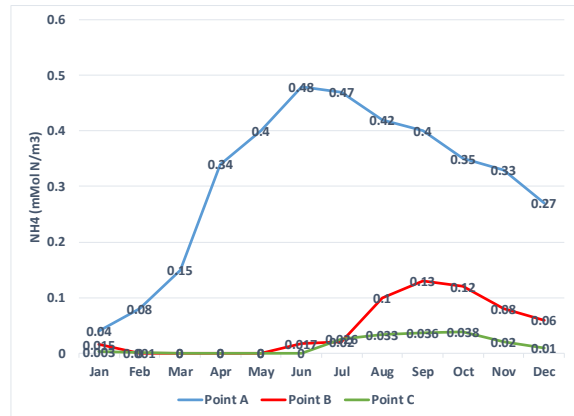


شکل ۱۵. الگوی توزیع ماهانه مؤلفه‌های سرعت جریانات در راستای محور شرقی غربی خلیج فارس و دریای عمان در ماه‌های سپتامبر (الف) و دسامبر (ب)، محور افقی و عمودی به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و نوار رنگی مقدار سرعت برحسب ms^{-1} است و مقادیر مثبت جریانات شرق سو و مقادیر منفی جریانات غرب سو را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. توزیع عمودی جریان در ماه‌های سپتامبر (الف) و دسامبر (ب) در مقطع انتخابی (۲۹-۲۷N، ۴۹/۵-۵۱E)

در ادامه با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مربوط به الگوی توزیع ماهانه و عمق نفوذ مؤلفه افقی شرقی غربی جریان سطحی ماه‌های سپتامبر و دسامبر، ارتباط بین تغییرات فصلی و زمانی متغیرهای مدل با جریانات منطقه بررسی می‌شود.



شکل ۱۴. تغییرات ماهانه آمونیم در سه نقطه انتخابی شمال غربی، میانی و شمال شرقی (55.3 E - 26.7 N و 52.5 E - 25 N و 48.5 E - 29.5 N) خلیج فارس

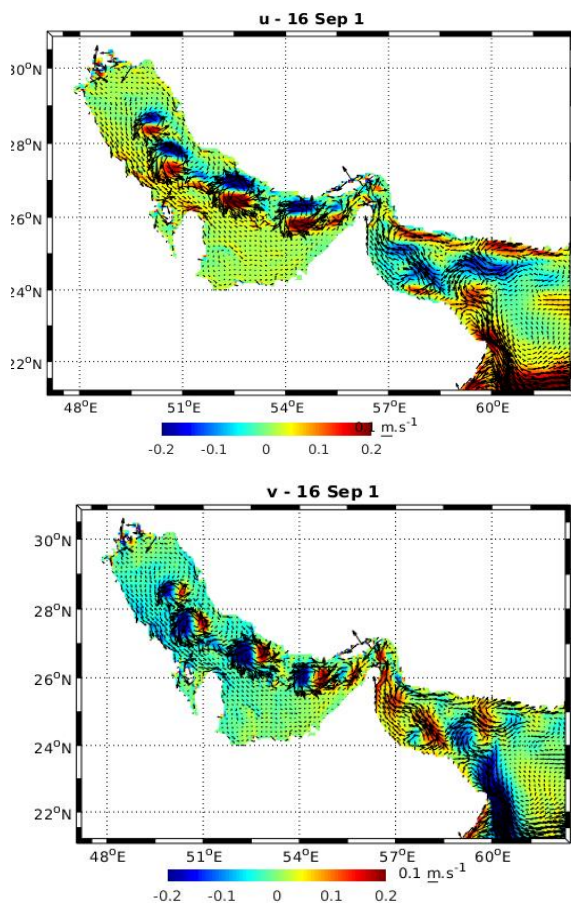
چنان که در تصویر سمت چپ شکل ۱۵ می‌بینید در ماه سپتامبر جریانات شرق سو، غرب سوی و پیچک‌های متعددی در کل منطقه حضور دارند، در صورتی که در تصویر سمت راست مربوط به ماه دسامبر اثری از پیچک‌ها در خلیج فارس دیده نمی‌شود و تنها چند پیچک در دریای عمان مشاهده می‌شود. توضیح اینکه مقادیر مثبت مربوط به جریانات شرق سو و مقادیر منفی جریانات غرب سو را نشان می‌دهند.

این پیچک‌ها همان‌طور که در تصویر ماه سپتامبر شکل ۱۶، نشان داده شده است به دلیل کم بودن عمق خلیج فارس تقریباً بیشتر عمق را پوشش داده‌اند و با حضور این پیچک‌ها لایه آمیخته‌ای از سطح تا نزدیک بستر تشکیل می‌شود و مواد مغذی از عمق به ناحیه نوری انتقال و تولید فیتوپلانکتونی افزایش می‌یابد. در ماه دسامبر نیز همان‌طور که دیده می‌شود با آرام شدن پیچک‌ها میزان کلروفیل آ و تولید فیتوپلانکتونی رو به افول می‌رود.

۴. بحث

در تفسیر الگوی توزیع کلروفیل آ، در منطقه خلیج فارس باید به دینامیک آب در منطقه توجه کرد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد گردش اصلی باروتروپیک در خلیج فارس شامل یک چرخاب و اچرخندی در جنوب شرقی این حوزه آبی است، بین ژوئن و اگوست با یک چرخنده در شمال غربی حوزه همراه می‌شود، و از جولای تا اکتبر نیز جایش را به پیچک‌های کوچک‌تر می‌دهد. گردش آب‌های ساحلی ایران نیز در بهار و تابستان در بخش شمالی خلیج فارس از تنگه هرمز تا شمال قطر جریان دارد و شامل تعدادی پیچک در مقیاس متوسط با قطری حدود ۱۱۵-۱۳۰ کیلومتر است که گستره عمودی آن‌ها همه عمق آب را در بر می‌گیرد. در دسامبر همان‌طور که باد شدت می‌گیرد لایه‌بندی کاهش می‌یابد و در زمستان این ساختار جایگزین ساختارهای کوچک می‌شود و جریان‌های موجود در این زمان بیشتر از الگوی بادهای تأثیر می‌گیرند. در این زمان گردش سطحی در بخش شمال غربی خلیج فارس تحت تأثیر باد و خروجی رودخانه‌های منطقه است که جریان‌هایی را در جنوب شرقی در طول سواحل ایران و کشورهای عربی پیش می‌برند و یک فراچاه در طول ساحل ایران و یک فروچاه در طول ساحل کشورهای عربی منطقه ایجاد می‌کنند [۲۴]. در حوزه غربی نیز جریان‌های شمالی در طول اروندرود جلو می‌روند و یک چرخنده کوچک را تشکیل می‌دهند. آب شور سواحل کم‌عمق نزدیک قطر را حمل و به جریان اصلی در بخش مرکزی خلیج فارس پیوند می‌زنند و جریان خروجی خلیج فارس (PGW^{۳۳}) از طریق تنگه هرمز را تغذیه می‌کنند و در طول مسیر خود یک منطقه بارور برای تولید اولیه را به وجود می‌آورند. ضمن اینکه در تابستان با بی‌ثباتی ICC و ایجاد پیچک‌های سواحل ایران، جریان‌های باروتروپیکی میان‌مقیاسی تولید می‌شود که نسبت به آب‌های اطراف دارای هسته‌های شور و سرد هستند [۱۴] و مواد مغذی لازم برای تولید اولیه را از عمق به سطح آورده، عمق لایه آمیخته را نیز افزایش می‌دهند و تولید فیتوپلانکتونی را در این منطقه بارور می‌کنند. بنابراین همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۷ دیده

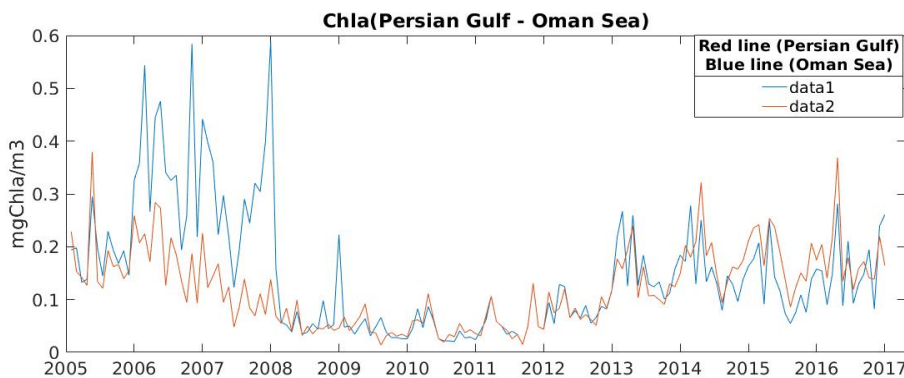
می‌شود، آب‌های سردتر ورودی از دریای عمان از اواسط بهار به سواحل شمالی ایران می‌رسند و در تابستان، همان‌طور که به سمت شمال غربی خلیج فارس پیش می‌روند، به چند پیچک تقسیم می‌شوند. در همین زمان جریان‌های آب گرم‌تر شمال غربی هم از جنوب خلیج فارس به سمت شرق و تنگه هرمز پیش می‌روند. این آب‌ها هسته‌های گرم و سردی را در مجاورت یکدیگر تشکیل می‌دهند که تقریباً همه عمق آب را پوشش داده و عمق لایه آمیخته را افزایش می‌دهند و بر مقدار و زمان تولید فیتوپلانکتونی به‌طور مستقیم اثر می‌گذارند.



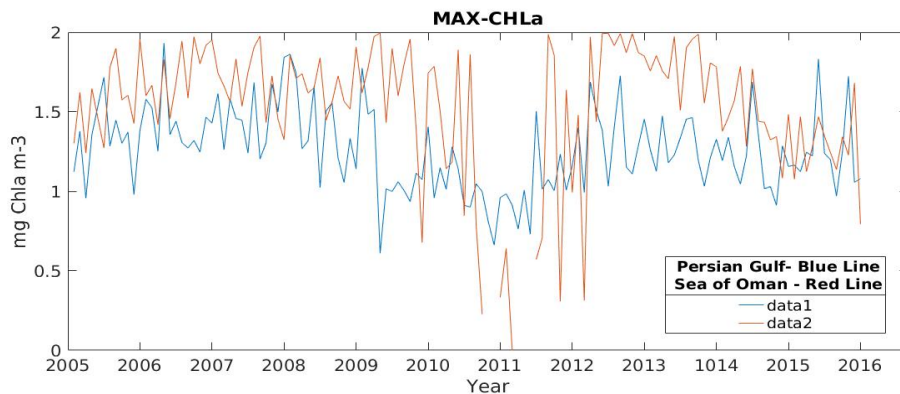
شکل ۱۷. الگوی توزیع مؤلفه‌های افقی جریان‌های سطحی خلیج فارس در راستای محور شرقی غربی (U) و شمالی جنوبی (V) در ماه سپتامبر، محور افقی و عمودی به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و نوار رنگی مقدار سرعت برحسب ms^{-1} است و مقادیر مثبت جریانات شرق سو و مقادیر منفی جریانات غرب سو را نشان می‌دهند.

برای اعتبارسنجی نتایج نمودارهای تغییرات سالانه میانگین و حداکثر کلروفیل آ، مربوط به سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ تهیه شده از آرشیو جهانی GMIS به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹

آورده شده است، علاوه بر آن نتایج مدل با پژوهش‌های انجام‌شده در منطقه نیز مقایسه شده است.



شکل ۱۸. میانگین کلروفیل سطحی خلیج فارس و دریای عمان در سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۷ آرشو جهانی GMIS، نمودار آبی و قرمز به ترتیب مربوط به تغییرات میانگین کلروفیل دریای عمان و خلیج فارس در سال‌های مورد اشاره هستند. محور افقی سال و محور عمودی مقدار کلروفیل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹. حداکثر کلروفیل آ، سطحی خلیج فارس و دریای عمان در سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۷ آرشو جهانی GMIS، نمودار آبی و قرمز به ترتیب مربوط به تغییرات حداکثر کلروفیل آ خلیج فارس و دریای عمان در سال‌های مورد اشاره هستند. محور افقی سال و محور عمودی مقدار کلروفیل را نشان می‌دهد.

برآورد شده است که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد [۳۴]. نتایج مدل مروستی و همکاران هم مقدار کلروفیل آ منطقه مورد مطالعه در دریای عمان را حداکثر $1.5-2 \text{ mgChlm}^{-3}$ نشان داده اند که با نتایج نشان داده شده در شکل ۱۹ مطابقت دارد. لازم به توضیح است که مدل اجرا شده در این پژوهش با داده‌های میانگین ماهانه است که استفاده از این نوع داده‌ها الگوی کلی تغییرات فصلی متغیرها را به دست می‌دهد و با اندازه‌گیری‌هایی که در منطقه و زمان خاص انجام می‌شود، تفاوت‌هایی دارد. زیرا اندازه‌گیری‌های میدانی به رخدادهای خاص در آن زمان و مکان بستگی دارد و الگوی کلی تغییرات فصلی را نشان نمی‌دهد. به عنوان نمونه نتایج تحقیق شریف‌نیا و همکاران در مناطق خاص و در زمان رخداد پدیده خاص کشند قرمز سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ انجام شده

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهند که مقدار متوسط کلروفیل آ، به دست آمده از GMIS در هر دو منطقه خلیج فارس و دریای عمان در طول این سال‌ها میانگین کمتر از 0.5 mgChlm^{-3} و پیک حداکثر 2 mgChlm^{-3} دارند که با نتایج گرفته شده از مدل در مناطق مختلف مطابقت دارد. در مطالعات دیگر انجام شده در مورد میانگین یا حداکثر مقدار کلروفیل آ خلیج فارس اطلاعاتی ارائه نشده، اما در مطالعه دریای عرب از دو پیک چرخه کلروفیل آ دریای عمان از اگوست تا سپتامبر، و فوریه تا مارس به ترتیب مربوط به پایان مونسون تابستانی جنوب غربی (SWM^{۲۴}) و مونسون زمستانی شمال شرق (NEM^{۲۵}) یاد شده که در آن بالاترین مقدار کلروفیل آ دریای عمان کمتر از 2 mgChlm^{-3} در هنگام NEM، و کمتر از 1 mgChlm^{-3} در زمان SWM

و همکاران نیز در مطالعات خود به این مسئله اشاره داشته‌اند [۳۷].

در خصوص تغییرات سالانه، با توجه به اجرای اقلیمی مدل نتیجه‌ای در دست نیست، اما نتایج ماهواره‌ای نشان می‌دهند که ضمن اینکه منطقه با افزایش کلروفیل آ بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ مواجه بوده است، میانگین کلروفیل آ، هر دو منطقه در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ افزایش دو برابری را نسبت به سال‌های ۲۰۰۹ تا پایان سال ۲۰۱۲ تجربه کرده است که مقدار آن به‌خصوص در خلیج فارس تقریباً با سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ برابری می‌کند. همچنین نمودار مقایسه کلروفیل آ در دو منطقه خلیج فارس و دریای عمان نیز حاکی از شباهت الگوی تغییرات این دو منطقه است، اما برخلاف سال‌های گذشته از اواسط سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ مقدار میانگین کلروفیل آ خلیج فارس از دریای عمان کمی بیشتر شده است. ضمن اینکه با صرف نظر کردن از مقادیر مربوط به بعضی مناطق ساحلی شمال غربی که مقادیر زیادی از کلروفیل آ را نشان می‌دهند، بیشترین مقدار کلروفیل آ در تمام این سال‌ها حداکثر حدود 2 mgChlm^{-3} بوده است. افزایش مقدار کلروفیل آ، در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ که پدیده کشند قرمز را به دنبال داشت، در نمودار میانگین مقدار کلروفیل دریافتی از ماهواره به‌خوبی مشخص است. همچنین باید از دو پدیده تأثیرگذار دیگر منطقه یعنی مونسون زمستانی شمال شرقی (NEM) و مونسون تابستانی جنوب غربی (SWM) که در باروری منطقه از نظر رشد فیتوپلانکتونی و الگوی تغییرات مقدار کلروفیل آ منطقه و به‌خصوص دریای عمان بسیار مؤثرند، نام برد. ضمن اینکه شدت NEM کمتر از SWM است، اما چون همراه با کاهش دمای سطح آب رخ می‌دهد، افزایش عمق لایه آمیخته و نرخ اختلاط آب را باعث می‌شود، که با فراچاه و بالا آمدن مواد مغذی از اعماق و افزایش مقدار کلروفیل آ و رشد فیتوپلانکتونی همراه است. این اتفاق در مونسون تابستانی تکرار می‌شود، با این تفاوت که آب سطحی گرم است و فراچاه ناشی از باد آب سردتری را همراه با مواد مغذی از اعماق به سطح می‌آورد.

است [۹]. بنابراین، در این مطالعه انتظار اینکه نتایج کاملاً منطبق با نتایج اندازه‌گیری‌های خاص باشد، وجود ندارد. نتیجه دیگر مشخص از شکل ۴ استقلال نسبی الگوی تغییرات کلروفیل آ خلیج فارس از دریای عمان است، زیرا الگوی جریان‌ها و تولید اولیه دریای عمان بیشتر تحت تأثیر مونسون‌های شمال شرقی، جنوب غربی و فراچاه‌هایی است که در نتیجه این بادها در آن منطقه رخ می‌دهد. در تصویر ماه دسامبر شکل ۱۶ مربوط به جریانات دیده می‌شود، زمانی که در خلیج فارس جریان‌ها رو به افول می‌روند، تعدادی پیچک در دریای عمان رشد کرده‌اند که باعث انتقال مواد مغذی از عمق و افزایش تولید فیتوپلانکتونی در آن زمان می‌شوند در صورتی که در این زمان تولید اولیه خلیج فارس رو به افول رفته است. تصویرهای الگوی توزیع ماهانه کلروفیل خلیج فارس نیز نشان می‌دهند که رشد کلروفیل آ و گسترش آن از بخش شمال غربی خلیج فارس شروع و به منطقه شرقی کشیده می‌شود و تا تنگه هرمز گسترش می‌یابد که مقدار نسبتاً بالای نترات ورودی از سواحل شمال غربی خلیج فارس و الگوی باد و جریانات منطقه توضیح مناسبی برای این الگوی تغییرات است. ال اضری نیز در مطالعه خود در خصوص شکوفایی جلبکی مضر در بعضی سواحل دریای عمان نتیجه می‌گیرد که تولید اولیه فیتوپلانکتونی، ابتدا از خلیج فارس شروع و به دریای عمان گسترش می‌یابد و در آنجا رشد بیشتری می‌کند که این نتیجه تأثیر اتفاقات خلیج فارس بر دریای عمان را نیز نشان می‌دهد [۳۵]. در خصوص علت استقلال نسبی رشد فیتوپلانکتونی خلیج فارس از دریای عمان می‌توان به نقش طوفان‌های منطقه‌ای که گردوخاک زیادی را به خلیج فارس منتقل می‌کنند اشاره کرد که باعث می‌شود خلیج فارس از نظر مواد مغذی فلزی مانند آهن غنی‌شده و رشد کلروفیل آ و شکوفایی فیتوپلانکتونی در آن شدت یابد. بارنالی و میشران نیز در بررسی خود به این نتیجه رسیدند که پس از بیشتر طوفان‌های گردوغبار مقدار کلروفیل آ منطقه افزایش می‌یابد؛ بنابراین قدرت طوفان‌های گردوغبار که همراه با افزایش مواد مغذی فلزی است، ممکن است به‌عنوان یکی از محرک‌های بالقوه بهره‌وری در منطقه در نظر گرفته شود [۳۶]، که انور

ضرایب پارامترهای فنل برای مدل بیولوژیکی خلیج فارس انتخاب شد.

نتایج حاصل از مدل اجرا شده، حاکی از این است که الگوی تغییرات ماهانه کلروفیل آ در خلیج فارس را می‌توان به دو منطقه تفکیک کرد. منطقه اول بخش شمال غربی است که رشد کلروفیل آ در بهار از آن منطقه آغاز می‌شود، تا اواخر تابستان و اوایل پاییز در امتداد سواحل جنوبی به طرف شرق گسترش می‌یابد. مقدار کلروفیل آ، این منطقه در تمام طول سال زیاد است و پیک آن در اوایل بهار است. منطقه دوم که شامل بخش‌های میانی خلیج فارس و تنگه هرمز است در تابستان بارور می‌شود و پیک مقدار آن در اواخر تابستان تا اوایل پاییز است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که الگوی رشد و گسترش کلروفیل آ در خلیج فارس یک استقلال نسبی از الگوی تغییرات فصلی کلروفیل آ دریای عمان دارد و تغییرات کلروفیل آ آن از الگوی جریان‌های خلیج فارس تبعیت می‌کنند. علاوه بر این مدل نشان می‌دهد که در شمال غربی خلیج فارس مقدار نترات غلظت زیادی دارد، که علتی برای شروع رشد شکوفه‌های فیتوپلانکتونی از بخش شمال غربی خلیج فارس و گسترش آن به سایر مناطق همراه با جریان‌های منطقه است.

با توجه به محدودیت‌ها، مدل بر اساس داده‌های اقلیمی آرشیوهای جهانی گفته شده، اجرا و با توجه به این که این داده‌ها به صورت میانگین ماهانه هستند، فقط الگوی کلی تغییرات فصلی تغییرات نتیجه می‌دهند. همچنین به علت اینکه سایر مطالعات انجام شده در منطقه به صورت میدانی و در تعداد محدودی ایستگاه و در زمان خاصی انجام شده‌اند، مقایسه نتایج این پژوهش با آن مطالعات نمی‌تواند دقت کافی داشته باشد. بنابراین برای جبران این کمبود و به دست آوردن ضرایب پارامترهای بیولوژیکی دقیق‌تر برای خلیج فارس و تهیه الگوی تغییرات سالانه منطقه به منظور بررسی رخدادهای خاص مانند کشند قرمز یا هر پدیده زمانی خاص دیگری باید مدل با داده‌های بیشتر و دقیق‌تر اجرا شود که این مهم در دست اجراست.

البته بررسی اثر مستقیم این پدیده‌ها بر تغییرات پارامترهای بیولوژیکی خلیج فارس از اهداف این مطالعه نیست، اما به طور کلی می‌توان به تأثیر آن‌ها بر جریان‌های خلیج فارس اشاره کرد. به عنوان نمونه یکی دیگر از علت‌های افزایش کلروفیل آ در زمستان آب‌های نزدیک سواحل ایران در دریای عمان پدیده فراچاه در طول مونسون شمال شرقی است که باعث انتقال مواد مغذی از اعماق به منطقه نوری می‌شود. علاوه بر فراچاه در سواحل، پدیده‌هایی مانند اختلاط آب‌ها، فرارفت، انتقال اکمن و پیچک‌های میان مقیاس ناشی از بادهای منطقه می‌توانند علاوه بر تأمین مواد مغذی مورد نیاز، تولید فیتوپلانکتونی یک منطقه را به خارج از منطقه تشکیل نیز منتقل نمایند.

۵. نتیجه گیری

به منظور بررسی تغییرات فصلی و سالیانه پارامترهای بیولوژیکی خلیج فارس یک مدل بیولوژیکی $N_2PChlZD_2$ جفت شده با مدل فیزیکی در ROMS مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر مربوط به شرایط اولیه و مرزی پارامترهای فیزیکی و بیولوژیکی مدل از آرشیو سنجنده‌های ماهواره‌ای مختلف تعبیه شده در ROMS تهیه شد. برای صحت‌سنجی و مقایسه نتایج مدل، مقدار کلروفیل آ سطحی جهانی از آرشیو GMIS تهیه و اطلاعات مربوط به خلیج فارس و دریای عمان از آن‌ها استخراج شد، پس از انجام تصحیحات لازم مربوط به تراکم ابر و وجود ذرات معلق مورد استفاده قرار گرفت. مدل با اطلاعات میانگین ماهانه مربوط به شرایط اولیه و مرزی برای یک دوره ده ساله اجرا شد و پس از اطمینان از همگرا شدن، نتایج سال دهم اجرا برای تجزیه و تحلیل و مقایسه با نتایج داده‌های ماهواره‌ای و سایر پژوهش‌ها انتخاب شد. اجرای مدل ابتدا با ضرایب پارامترهای بیولوژیکی پیش فرض در ROMS انجام شد، اما برای بررسی اثر ضرایب و حساسیت آن‌ها در نوبت‌های بعدی مدل با مقادیرهای پیشینه و کمینه محدوده تئوریک ضرایب، و جدول ضرایب فنل راه‌اندازی شد و در هر نوبت نتایج حاصل با نتایج کلروفیل آ دریافتی از GMIS مقایسه شد، که در نهایت با مشخص کردن پارامترهای حساس مدل و مقایسه‌های انجام شده، جدول

- phytoplankton blooms in the Northwestern Arabian Sea and Gulf of Oman. *Biogeosciences*. 2016 Feb 23;13(4):1049-69.
- [9] Sharifinia M, Penchah MM, Mahmoudifard A, Gheibi A, Zare R. Monthly variability of chlorophyll- α concentration in Persian Gulf using remote sensing techniques. *Sains Malaysiana*. 2015 Mar 1;44(3):387-97.
- [10] Aberle N, Piontkovski SA. Seasonal dynamics of microzooplankton communities in the Sea of Oman. *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 2019 Apr 3;22(2):131-40.
- [11] Hamzei S, Bidokhti AA, Mortazavi MS, Gheibi A. Utilization of satellite imageries for monitoring harmful algal blooms at the Persian Gulf and Gulf of Oman. In: 2012 Int Conf Environ Biomed Biotechnol IPCBEE 2012 (Vol. 41, pp. 171-174).
- [12] Emery KO. Sediments and water of Persian Gulf. *AAPG Bulletin*. 1956 Oct 1;40(10):2354-83.
- [13] Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical Oceanography*. 2010 Sep;40(9):2122-34.
- [14] Pous S, Carton XJ, Lazure P. A process study of the wind-induced circulation in the Persian Gulf. *Open Journal of Marine Science*. 2013;3(1):27160.
- [15] Ezam M, Bidokhti AA, Javid AH. Numerical simulations of spreading of the Persian Gulf outflow into the Oman Sea. *Ocean Science*. 2010 Oct 11;6(4):887-900.
- [16] Bidokhti AA, Ezam M. The structure of the Persian Gulf outflow subjected to density variations. *Ocean Science*. 2009 Jan 12;5(1):1-2.
- [17] Yao F, Johns WE. A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 2. Formation and export of Persian Gulf Water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010 Nov;115(C11).
- [18] Pous S, Carton XJ, Lazure P. A process study of the wind-induced circulation in the Persian Gulf. *Open Journal of Marine Science*. 2013;3(1):27160.
- [19] Shchepetkin AF, McWilliams JC. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean modelling*. 2005 Jan 1;9(4):347-404.
- [20] Eppley RW. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*. 1972 Jan 1;70(4):1063-85.
- [21] Millero FJ. *Chemical oceanography*. CRC press; 1996 Jun 25.
- [22] Parker RA. Dynamic models for ammonium inhibition of nitrate uptake by phytoplankton.

۶. سپاسگزاری

در این تحقیق از توسعه‌دهندگان مدل عددی ROMS که این کد را به صورت رایگان در اختیار پژوهشگران قرار داده‌اند و مراکز مرتبط با آرشیو جهانی اقیانوسی و جوی WOA2009 و ICOADS و GMIS تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Takahashi T, Sutherland SC, Sweeney C, Poisson A, Metzl N, Tilbrook B, et al. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002 Jan 1;49(9-10):1601-22.
- [2] Molina E. Controls on Southern Ocean phytoplankton production: a systems approach [dissertation]. University of Tasmania; 2012.
- [3] Fasham MJ, Ducklow HW, McKelvie SM. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*. 1990 Aug 1;48(3):591-639.
- [4] Fennel K, Wilkin J, Levin J, Moisan J, O'Reilly J, Haidvogel D. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochemical Cycles*. 2006 Sep;20(3).
- [5] Gutknecht E, Dadou I, Vu BL, Cambon G, Sudre J, Garçon V, Machu E, Rixen T, Kock A, Flohr A, Paulmier A. Coupled physical / biogeochemical modeling including O₂-dependent processes in the Eastern Boundary Upwelling Systems: application in the Benguela. *Biogeosciences*. 2013 Jun 3;10(6):3559-91.
- [6] Powell TM, Lewis CV, Curchitser EN, Haidvogel DB, Hermann AJ, Dobbins EL. 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*. 2006 Jul;111(C7).
- [7] Aumont O, Éthé C, Tagliabue A, Bopp L, Gehlen M. PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development*. 2015 Aug 13;8(8):2465-513.
- [8] Sedigh Marvasti S, Gnanadesikan A, Bidokhti AA, Dunne JP, Ghader S. Challenges in modeling spatiotemporally varying

- Marine Biology Research. 2012 Feb 1;8(2):189-94.
- [35] Al-Azri AR, Al-Hashmi KA, Al-Habsi H, Al-Azri N, Al-Khusaibi S. Abundance of harmful algal blooms in the coastal waters of Oman: 2006–2011. *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 2015 Jul 3;18(3):269-81.
- [36] Das B, Mishra AK. Effect of dust storm on phytoplankton productivity in Arabian Sea. *Journal of Remote Sensing & GIS*. 2013 Nov 29;4(3):33-44.
- [37] Anwar M, Gharib I, Al-Hashash M, ZAGHLOUL N. Surface modelling of dust fallout on the ROPME Sea Area. Annual research report-Kuwait Institute for Scientific Research. 1986:121-4.
- Ecological Modelling. 1993 Mar 1;66(1-2):113-20.
- [23] Kirk JT. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge university press; 1994 Apr 21.
- [24] Falkowski PG. Light-shade adaptation in marine phytoplankton. In: Primary productivity in the sea. Springer, Boston, MA;1980. p. 99-119.
- [25] Falkowski PG, Dubinsky Z, Wyman K. Growth-irradiance relationships in phytoplankton 1. *Limnology and Oceanography*. 1985 Mar;30(2):311-21.
- [26] Geider RJ. Light and temperature dependence of the carbon to chlorophyll a ratio in microalgae and cyanobacteria: implications for physiology and growth of phytoplankton. *New Phytologist*. 1987 May 1:1-34.
- [27] Olson RJ, RJ O. Differential photoinhibition of marine nitrifying bacteria: a possible mechanism for the formation of the primary nitrite maximum.
- [۲۸] قاضی ارم، عظام مجتبی، علی اکبری بیدختی عباسعلی،
تراپی آزاد مسعود، حسن زاده اسماعیل. شبیه سازی جبهه
ترموهالاینی جریان خروجی خلیج فارس در دریای
عمان. هیدروفیزیک. ۱۳۹۷؛ ۴(۱۱): ۱-۱۸.
- [29] Levitus, Sydney; US DOC/NOAA/NESDIS. NODC Standard Product: World Ocean Atlas 1994 (11 disc set) (NCEI Accession 0098057). National Oceanographic Data Center;2013.
- [30] Chelton DB, DeSzoek RA, Schlax MG, El Naggar K, Siwertz N. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation. *Journal of Physical Oceanography*. 1998 Mar;28(3):433-60.
- [31] Mellor GL, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*. 1982 Nov;20(4):851-75.
- [32] Powell TM, Lewis CV, Curchitser EN, Haidvogel DB, Hermann AJ, Dobbins EL. 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*. 2006 Jul;111(C7).
- [33] Jiang R, Wang YS. Modeling the ecosystem response to summer coastal upwelling in the northern South China Sea. *Oceanologia*. 2018 Jan 1;60(1):32-51.
- [34] Piontkovski SA, Claereboudt MR. Interannual changes of the Arabian Sea productivity.

پی نوشت

1. Biogeochemical.
2. Eastern bio upwelling system.
3. Pelagic interaction scheme for carbon and ecosystem studies.
4. Indian ocean surface water
5. Thermohaline
6. gyre
7. Iran coastal currents
8. Iran coastal eddy
9. Upwelling
10. Downwelling
11. Regional ocean modeling system
12. Mode splitting
13. terrain-following
14. Nesting
15. Fresh water
16. Michaelis – Menten
17. Photosynthesis Active Radiation
18. World Ocean Atlas 2009
19. Courant–Friedrichs–Lewy condition
20. Mellor and Yamada 2.5
21. Comprehensive Ocean Atmosphere Dataset
22. Climatic
23. Persian Gulf Water
24. South western monsoon
25. North eastern monsoon