

تحلیل روند و تغییرات مکانی و زمانی غلظت کلروفیل *a* در خلیج فارس و دریای عمان (۲۰۱۸-۲۰۰۳)مریم کریمیان^۱، امید بیرقدار کشکولی^{۱*}، رضا مدرس^۱، سعید پورمنافی^۱

۱- دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

کلروفیل *a* رنگدانه اصلی فیتوپلانکتونی است که به عنوان یک شاخص زیست توده فیتوپلانکتونی و منعکس کننده تولید اولیه در محیط دریایی است. روند تغییرات در مجموعه داده‌های سری زمانی در طول دوره مطالعه می‌تواند الگوهای عمومی تغییرات و همچنین تغییرات احتمالی در آینده را نشان دهد. در این پژوهش از داده‌های سطح ۳ (۴ کیلومتر) غلظت کلروفیل *a* خلیج فارس و دریای عمان برای سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۳ استفاده گردید. داده‌ها در محیط ArcGIS10.5 به فرمت رستر تبدیل و سپس مقادیر عددی هر پیکسل در نرم افزار R (version 4.0.2) استخراج گردید. داده‌های مفقوده در داده‌های کلروفیل *a* مشاهده شد، برای حل این مشکل از الگوریتم DINEOF و از آزمون ناپارامتریک من-کندال و سنس‌استیمیتور به منظور تحلیل روندهای غلظت کلروفیل *a* استفاده شد. نتایج نشان داد که حداکثر غلظت کلروفیل *a* در ماه‌های سپتامبر (۰/۰۹ تا ۱۸/۷۵ میلی‌گرم بر متر مکعب) و اکتبر (۰/۲۳ تا ۱۸/۰۳ میلی‌گرم بر متر مکعب) و حداقل مقدار غلظت کلروفیل *a* در ماه‌های می (۰/۲۲ تا ۵/۷۴ میلی‌گرم بر متر مکعب) و ژوئن (۰/۲۰ تا ۵/۱۲ میلی‌گرم بر متر مکعب) است. شیب روند غلظت کلروفیل *a* در ۱۶ سال مورد مطالعه در اکثر مناطق منفی و فاقد معنی‌داری بود. این تحقیق ارائه یک توصیف کلی از تغییرات غلظت کلروفیل *a* و شیب تغییرات آن بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای است. با این حال، تحقیقات بیشتر بر اساس مشاهدات درجا برای دستیابی به کمیت بهتر مورد نیاز است.

کلید واژه‌ها: غلظت کلروفیل *a*، مودیس، خلیج فارس، دریای عمان، آزمون من-کندال گرمابی.

مقدمه

کلروفیل *a* که به عنوان شاخصی از زیست توده فیتوپلانکتونی شناخته شده است در مطالعات اقیانوس‌شناسی نقش مهمی را ایفا می‌کند و تعیین آن برای ارزیابی سطوح تولید اولیه ضروری است [۲،۸]. این سطوح برای تحلیل نوسانات شار کربن در تعامل اقیانوس-اتمسفر [۳،۸] و همچنین تعیین میزان و قابلیت تولید اقیانوس‌ها مفید هستند [۴]. بنابراین شاخص وضعیت تروفیک، در حال حاضر برای ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیم و همچنین الگوهای چرخه بیوشیمیایی به عنوان یک شاخص مهم در مطالعات اقیانوسی در نظر گرفته می‌شود [۵]. تولید اولیه فیتوپلانکتونی پایه اصلی شبکه غذایی اکوسیستم پلاژیک اقیانوس‌ها و سیستم‌های آبی است که میزان تبدیل دی‌کسید کربن به کربن آلی را از طریق فتوسنتز تعیین می‌کند [۶].

در طول قرن گذشته تجزیه و تحلیل پارامترهای اقیانوس‌شناسی کاهش جهانی غلظت کلروفیل *a* [۸،۷] ایجاد شده توسط عواملی مانند اقلیم و تغییرپذیری پارامترهای اقیانوس‌شناسی، افزایش دمای سطح دریا (SST) [۱]، افزایش لایه‌بندی و در نتیجه محدودیت دسترسی به مواد مغذی را نشان داده‌اند [۷]. تغییرات اقلیمی در حال تغییر محیط‌های زیستی و غیر زیستی (شرایط فیزیکی، مواد مغذی و غیره) هستند که بر گونه‌های مختلف، پویایی جمعیت فیتوپلانکتون‌ها و ساختارهای جامعه، اکوسیستم‌های آبی از طریق تغییرات در پایه شبکه غذایی تأثیر می‌گذارد و در نتیجه کل اکوسیستم را تغییر می‌دهد [۵].

نوع مقاله

مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵

تاریخ چاپ الکترونیکی: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

*نویسنده مسول

omid.beyraghdar@iut.ac.ir

^۱ Sea Surface Temperature

نوسان ال نینو-جنوبی (ENSO)^۲، نوسان چرخشی اقیانوس آرام شمالی (NPGO)^۳، دوقطبی اقیانوس هند (IOD)^۴ و نوسان چند دهه‌ای اقیانوس اطلس (AMO)^۵ همگی می‌توانند بر تولید اولیه فیتوپلانکتونی تأثیر گذارند [۹-۱۳]. این تغییرات طبیعی در شرایط ستون آب می‌توانند باعث ایجاد تغییرات ۱۰ برابری در تولید اولیه بین مناطق مختلف با مواد مغذی کم در آب‌های نیمه‌گرمسیری و مناطق ساحلی بسیار اوتروفیک شود. توده فیتوپلانکتون‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی در مقیاس منطقه‌ای قرار می‌گیرند [۱۵، ۱۴] و این عوامل شامل مواردی مانند مانسون، فراچاهندگی، جریان‌های ساحلی، اختلاط عمودی، سرعت باد و غیره هستند [۱۶].

سنجش از دور ماهواره‌ای یک رویکرد مهم است که نه تنها برای تخمین تولیدات اولیه جهانی استفاده می‌شود، بلکه باعث توسعه مطالعات بیشتر در مورد فرآیندهای فیزیکی-زیستی اکوسیستم‌های دریایی و چرخه‌های کربن در هر دو سطح جهانی و منطقه‌ای می‌شود [۱۷].

تعداد قابل توجهی از مطالعات توزیع مکانی کلروفیل *a* را در مناطق مختلف به عنوان مثال در سراسر جهان [۱۹، ۱۸]، جریان‌های مرزی [۲۰]، مناطق ساحلی [۲۲، ۲۱]، مصب‌ها و مناطق بالارونده [۲۳] توصیف کرده‌اند. تغییرپذیری زمانی غلظت کلروفیل *a* در مقیاس‌های روزانه [۲۵، ۲۴]، فصلی [۲۶] تا بین‌سالانه [۲۷] نیز به خوبی مستند شده‌اند. در پژوهشی از داده‌های غلظت کلروفیل *a* و دمای سطح دریا حاصل از سنجنده مودیس-آکوا در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ در جنوب شرقی خلیج فارس و شمال غربی دریای عمان استفاده شد. بخشی از نتایج این تحقیق نشان داد که میانگین سالانه مقدار کلروفیل *a* در شمال غربی دریای عمان ۱/۸۶ میلیگرم بر متر مکعب است و در مقایسه با جنوب شرقی خلیج فارس (۱/۷۸ میلیگرم بر متر مکعب)، کمترین تغییر را نشان می‌دهد. بیشترین غلظت کلروفیل *a* در فوریه و مارس و کمترین میزان آن در ماه‌های می، ژوئن و جولای (۰/۸۵ تا ۲/۹۲ میلیگرم بر متر مکعب) در جنوب شرقی خلیج فارس و در شمال غربی دریای عمان (۰/۳۷ تا ۴/۹ میلیگرم بر متر مکعب) مشاهده شد [۲۸]. مرادی و کبیری تغییرات مکانی-زمانی SST و غلظت کلروفیل *a* در خلیج فارس را با استفاده از داده‌های مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳ ارزیابی کردند. نتایج بیشترین و کمترین غلظت کلروفیل *a* را به ترتیب در زمستان و بهار نشان دادند [۲۹]. در تحقیقی بر اساس تصاویر مودیس-آکوا تغییرات دمای سطح آب، تابش فعال فتوسنتزی، عمق سشی‌دیسک و غلظت کلروفیل *a* دریا‌های حاشیه‌ای اوراسیا از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ بررسی شد. بخشی از نتایج این تحقیق همانطور که انتظار می‌رفت نشان داد که کلروفیل *a* به طور کلی در دریا‌های حاشیه‌ای گرمسیری کاهش، اما در دریا‌های حاشیه‌ای با عرض جغرافیایی بالا افزایش یافته است. [۳۰].

مرادی تغییرات مکانی و زمانی و روند غلظت کلروفیل *a* در خلیج فارس را با استفاده از داده‌های مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ ارزیابی کرد. آنالیز روند منطقه مورد مطالعه، روند پایدار و قابل شناسایی را با حداکثر تمایل به کاهش غلظت کلروفیل *a* نشان داد. بیش از ۴۸ درصد از مساحت مورد مطالعه در حال کاهش اندک و حدود ۲۰ درصد از مساحت که عمدتاً در قسمت‌های شمالی قرار گرفته‌اند، افزایش اندک در مقادیر غلظت کلروفیل *a* را نشان داد [۳۱].

در مطالعه‌ای داده‌های کلروفیل *a* حاصل از سنجنده مودیس ماهواره آکوا با وضوح ۱×۱ کیلومتر مربع برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ در خلیج فارس و دریای عمان استفاده شد. نتایج بالاترین غلظت کلروفیل *a* را در تنگه‌هرمز با میانگین ۲/۸ میلیگرم در متر مکعب نشان دادند که ۱/۱ میلیگرم بر متر مکعب بالاتر از میانگین کل منطقه مورد مطالعه است [۳۲].

خلیج فارس فعال‌ترین منطقه تولید و تجارت نفت در جهان [۳۳] و همچنین در میان تأثیر پذیرترین مناطق زمین نسبت به فعالیت‌های انسانی می‌باشد [۳۴]. این خلیج شاهد یک توسعه و رشد مداوم و بی‌سابقه در جمعیت انسانی در منطقه ساحلی خود است که با بهره‌برداری فزاینده از منابع و تقاضای خدمات از محیط دریایی همراه است. این عوامل استرس‌زای عظیم از منابع مختلف از قبیل تخلیه‌ها از عملیات لایروبی ساحلی، پساب

² El Niño-Southern Oscillation

³ North Pacific Gyre Oscillation

⁴ Indian Ocean Dipole

⁵ Atlantic Multidecadal Oscillation

نیروگاه‌های آب و نمک‌زدایی، صنایع پتروشیمی، گسترش تاسیسات بندرگاه‌ها، افزایش حمل و نقل، تخلیه آب بالادست و فاضلاب از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ایجاد می‌شود [۳۵]. اثرهای تجمعی ناشی از عوامل استرس‌زای متعدد منجر به کاهش آشکار زندگی دریایی در خلیج فارس می‌شود [۳۶]. بنابراین نظارت و ارزیابی سلامت اکوسیستم و کیفیت آب در خلیج فارس بسیار مهم است. در بسیاری از مطالعات در سطح جهانی، گونه‌های فیتوپلانکتونی یا زیست‌توده (کلروفیل a) را به عنوان شاخص مهم کیفیت آب استفاده شده‌اند [۳۷]. برای نظارت، ارزیابی و در نهایت گام نهادن در مدیریت پایدار منابع دریایی [۳۸] ارائه اطلاعات طولانی‌مدت در مورد پویایی فیتوپلانکتون‌ها ضروری است.

تحقیق پیش رو با هدف محاسبه شاخص روند تغییرات غلظت کلروفیل a به وسیله آزمون من-کندال و شیب خط سنس استیمیتور پایه‌گذاری شده است. در این مطالعه روندهای بلندمدت تغییرات غلظت کلروفیل a در منطقه خلیج فارس و دریای عمان برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ به صورت انفرادی و مجزا برای هر یک از پیکسل‌های موجود در تصاویر ماهواره‌ای دریافتی محاسبه می‌گردد. در نهایت توزیع مکانی و زمانی روندها و تغییرات به صورت ماهیانه و همچنین برای کل دوره زمانی مدنظر ارزیابی و طبقه‌بندی خواهد شد.

منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس در خاورمیانه بین عرض جغرافیایی ۲۴ و ۳۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ و ۵۶/۵ شرقی قرار دارد و از شمال اقیانوس هند به وسیله تنگه هرمز و دریای عمان (شکل ۱) جدا شده است [۳۹، ۴۰]. این خلیج دارای طول ۹۹۰ کیلومتر با حداکثر عرض ۳۳۸ کیلومتر و عمق متوسط ۳۶ متر برای بیشتر سواحل عربی و ۶۰ متر عمق در امتداد سواحل ایران می‌باشد [۴۱، ۴۲]. اقلیم خلیج فارس در تابستان گرمسیری و در زمستان معتدل است [۴۳] و اقلیم آن دارای دو فصل اصلی زمستان (دسامبر تا مارس) و تابستان (ژوئن تا سپتامبر) و دو دوره گذار پاییز (اکتبر تا نوامبر) و بهار (آوریل تا می) است [۴۴]. در تابستان دمای هوا تا ۵۱ درجه سانتیگراد با میانگین ۴۱ درجه سانتیگراد می‌رسد در حالی که در زمستان دمای هوا تا ۱۵ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد [۴۵]. اندازه‌گیری میزان تولیدات اولیه فیتوپلانکتونی و همچنین غلظت کلروفیل a در منطقه دریایی راپمی بیانگر آن است که غلظت کلروفیل a در خلیج فارس بین ۰/۲ تا ۰/۸۶ میلی‌گرم در متر مکعب است [۴۶]. مشکلات مربوط به شکوفایی میکرو جلبک‌های دریایی، که به عنوان شکوفایی جلبک‌های مضر (HABS) یا کشندهای قرمز شناخته می‌شوند نیز در این منطقه به طور بارز مطرح است [۳۰]. دریای عمان بخشی از اقیانوس هند است که از دریای عرب تا سرزمین اصلی ایران (۲۲ تا ۲۶ درجه شمالی، ۵۶ تا ۶۲ درجه شرقی) گسترش یافته است. طول آن حدود ۵۴۵ کیلومتر [۴۷] و دارای مساحت ۹۴۰۰۰ کیلومتر مربع است [۴۸]. اقلیم‌شناسی این دریا تحت تاثیر دو فصل مانسونی یعنی مانسون زمستانی که از نوامبر تا آوریل رخ می‌دهد با بادهای کم سرعت شمال شرقی همراه است و مانسون تابستانی که از ژوئیه تا سپتامبر و با سرعت بالا بادهای جنوبی و جنوب غربی مشخص می‌شود [۴۹].



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه [۵۰]

مواد و روش‌ها

داده‌های غلظت کلروفیل a خلیج فارس و دریای عمان حاصل از تولیدات سنجنده مودیس سطح ۳ (وضوح ۴ کیلومتر) که دارای فرمت nc هستند برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ از سایت OceanColor ناسا (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) دانلود شد. داده‌های ماهواره-ای در محیط ArcGIS10.5 به فرمت رستر تبدیل و سپس مقادیر عددی هر پیکسل در نرم افزار R (version4.0.2) استخراج گردید. چندین شکاف در تولیدات مودیس سطح ۳ کلروفیل a ، حاصل از نبود مشاهدات به علت هوای ابری، گردوغبار، زاویه دید نامناسب ماهواره وجود داشت که بیشترین تعداد گپ یا شکاف در فصل تابستان مشاهده شد. برای حل مشکل شکاف‌ها و بازسازی داده‌های مفقوده کلروفیل a از الگوریتم DINEOF^۶ در R (version4.0.2) استفاده شد. این الگوریتم در نرم‌افزارهای دیگر به طور مشابه برای تغییرات کلروفیل a و دمای سطح آب منطقه آرام جنوبی [۵۱]، دریای مدیترانه [۵۲] و دمای سطح دریای شمال [۵۳] استفاده شده است. در این تحقیق از آزمون ناپارامتریک من-کندال و سنس استیمتور به منظور تحلیل روند و معنی‌داری داده‌های غلظت کلروفیل a در منطقه خلیج فارس و دریای عمان و تعیین آن از بسته-ها یا پکیج‌هایی مثل openxlsx و trend در R استفاده شد. در نهایت نقشه میانگین‌های طولانی‌مدت تغییرات و روند غلظت کلروفیل a با تعیین الگوی مکانی در محیط ArcGIS10.5 ترسیم شد.

آنالیزهای آماری مورد استفاده

الگوریتم DINEOF

برای این الگوریتم یک ماتریس X با ابعاد $M \times N$ در نظر گرفته می‌شود. M و N به ترتیب اندازه‌های مکانی و زمانی است. ناهنجاری‌ها محاسبه می‌شوند و داده‌های از دست رفته به میانگین (یعنی به یک ناهنجاری صفر) نرمال می‌شوند. ابتدا غالب‌ترین حالت EOF این ماتریس به دست می‌آید و داده‌های از دست رفته با استفاده از فرمول ۱ محاسبه می‌شود:

$$X_{m,n} = USV^T \quad (۱)$$

که در آن $m = 1, 2, \dots, M$ و $n = 1, 2, \dots, N$ و U یک ماتریس با ابعاد $m \times r$ ، نشان‌دهنده EOF های مکانی، V^T یک ماتریس با ابعاد $n \times r$ نشان‌دهنده EOF های زمانی و S یک ماتریس $r \times r$ حاوی مقادیر منفرد می‌باشد. $r \leq \min(m, n)$ می‌باشد و در واقع نشان‌دهنده رتبه ماتریس X است. برای بازسازی X ، تنها مهم‌ترین EOF مکانی و زمانی استفاده می‌شود. تخمین جدید X برای داده‌های از دست رفته مجدداً به ماتریس داده وارد می‌شوند و محاسبه حالت EOF تکرار می‌شود. این فرآیند به صورت متوالی تا زمان همگرایی مقادیر از دست رفته ادامه می‌یابد و در نتیجه حالت‌های EOF محاسبه شده، به ۲ و سپس به ۳ و غیره افزایش می‌یابد [۵۴].

تحلیل روند

آزمون‌ها برای تشخیص روندهای معنی‌دار در سری‌های زمانی اقلیم‌شناسی را می‌توان به عنوان روش‌های پارامتری و ناپارامتریک طبقه‌بندی کرد. آزمون‌های روند پارامتری نیازمند مستقل بودن و توزیع نرمال داده‌ها، در حالی که آزمون‌های روند ناپارامتریک فقط نیازمند مستقل بودن داده‌ها هستند. در این تحقیق دو روش ناپارامتریک (من-کندال و سنس استیمتور) برای تشخیص و شیب روند غلظت کلروفیل a استفاده شده است [۵۵].

الف- آزمون من-کندال

آماره آزمون من-کندال به شکل زیر محاسبه شده است [۵۶، ۵۷].

^۶ Data INterpolating Empirical Orthogonal Function

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sig}(x_j - x_i) \quad (2)$$

که در آن n تعداد نقاط داده، x_i و x_j به ترتیب مقادیر داده در سری زمانی i و j هستند ($i < j$). $\text{sgn}(x_j - x_i)$ به عنوان تابع علامت است و به شرح زیر است:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

واریانس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t(t-1)(2t+5)] / 18 \quad (4)$$

که n تعداد داده‌های مشاهده شده، q تعداد سری‌های است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t بیانگر فراوانی داده‌ها با ارزش یکسان می‌باشد. معنی‌داری آماری سری با مقدار Z به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_\alpha = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

در فرمول‌های فوق Z آماره کندال، S مجموع تابع علامت داده‌های Z و k ام سری مشاهدات و var واریانس آزمون است. در روش من-کندال دو فرض صفر (H_0) و یک (H_1) مورد آزمون قرار می‌گیرد. به طوری که تأیید فرض صفر عدم وجود روند در داده‌ها و تأیید فرض یک نشان‌دهنده وجود روند معنی-دار در سری داده‌ها می‌باشد، بنابراین فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه ۶ برقرار باشد

$$|Z| \leq Z_\alpha / 2 \quad (6)$$

در این رابطه α سطح معنی‌داری برای آزمون و Z_α آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌دار α می‌باشد که به دلیل دو دامنه بودن آزمون، $\frac{\alpha}{2}$ استفاده می‌شود. برای بررسی روند در سری داده‌ها باید مقادیر Z استاندارد نسبت به سطح معنی‌داری مورد نظر سنجیده شوند. موقعیت Z نسبت به سطح اطمینان مورد نظر معنی‌داری و یا عدم معنی‌داری را مشخص می‌کند [۵۸]. سطوح معنی‌داری $\alpha = 0.01$ و $\alpha = 0.05$ استفاده می‌شود. فرض صفر عدم وجود روند در سطح معنی‌داری ۵ درصد اگر $|Z_\alpha| > 1.96$ و در سطح معنی‌داری ۱ درصد اگر $|Z_\alpha| > 2.576$ باشد، رد می‌شود [۵۵].

ب- تعیین شیب روند و معادله خط به روش سنس استیمیتور

سنس در سال ۱۹۶۸ روش ناپارامتریکی را برای تخمین شیب روند در نمونه N جفت داده ایجاد کرد [۵۹]:

الف: محاسبه شیب بین هر جفت داده در سری داده‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i = \frac{(X_j - X_k)}{j - k} \quad (7)$$

که در آن X_j و X_k مقادیر داده، به ترتیب داده‌های مشاهداتی در زمان‌های j و k هستند ($k < j$).

اگر در هر دوره زمانی فقط یک داده وجود داشته باشد، پس $N = \frac{n(n-1)}{2}$ است که در آن n تعداد دوره‌های زمانی است. اگر چندین مشاهده در یک یا چند دوره زمانی وجود داشته باشد، پس $N < \frac{n(n-1)}{2}$ است که در آن n تعداد کل مشاهدات است.

N تعداد از Q_i از کوچکترین به بزرگترین مرتب می‌شوند و میانه شیب یا استیمیتور شیب سنس به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[(N+1)/]} & \text{اگر } N \text{ فرد باشد} \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}}{2} & \text{اگر } N \text{ زوج باشد} \end{cases} \quad (8)$$

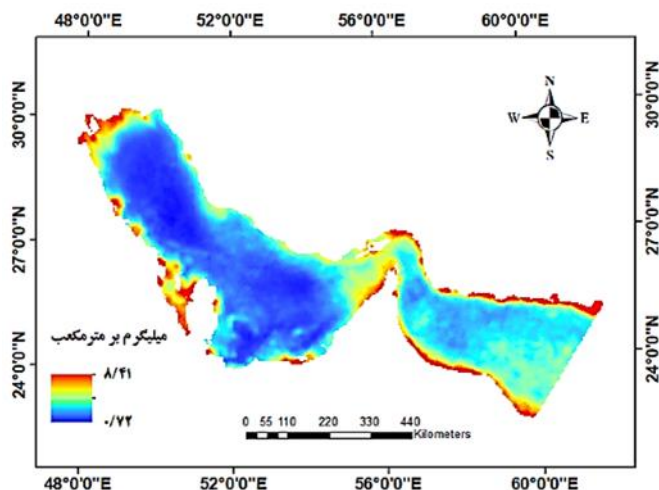
علامت Q_{med} روند داده‌ها را منعکس می‌کند، اگر شیب خط روند مثبت باشد حاکی از صعودی بودن روند و اگر منفی باشد حاکی از نزولی بودن روند است. در حالی که مقدار آن نشان‌دهنده شیب روند است. برای تعیین اینکه آیا میانه شیب از نظر آماری با صفر متفاوت است، باید فاصله اطمینان Q_{med} را با احتمال خاصی بدست آورد. فاصله اطمینان در مورد شیب زمانی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۶۰]:

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{var}(S)} \quad (9)$$

در این رابطه $\text{var}(S)$ همان واریانس محاسبه شده در آزمون من-کندال، α سطح معنی‌داری و Z آماره توزیع نرمال استاندارد است که در یک آزمون دو دانه، بر اساس سطح اطمینان مورد آزمون می‌تواند مقادیر متفاوتی به خود بگیرد. این آماره برای سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر با $Z = 1/96$ و در سطح اطمینان ۹۹ درصد برابر با $Z = 2/58$ در نظر گرفته می‌شود. سپس، $M_1 = \frac{N - C_\alpha}{2}$ و $M_2 = \frac{N + C_\alpha}{2}$ محاسبه می‌شود. حدهای پایین‌تر و بالاتر فاصله اطمینان (Q_{min} و Q_{max})، بزرگترین M_1 و بزرگترین $M_2 + 1$ ام برآورد مرتب شده شیب N هستند [۶۲]. شیب Q_{med} از نظر آماری با صفر اگر دو حد (Q_{max} و Q_{min}) علامت مشابهی داشته باشند، متفاوت است [۵۵].

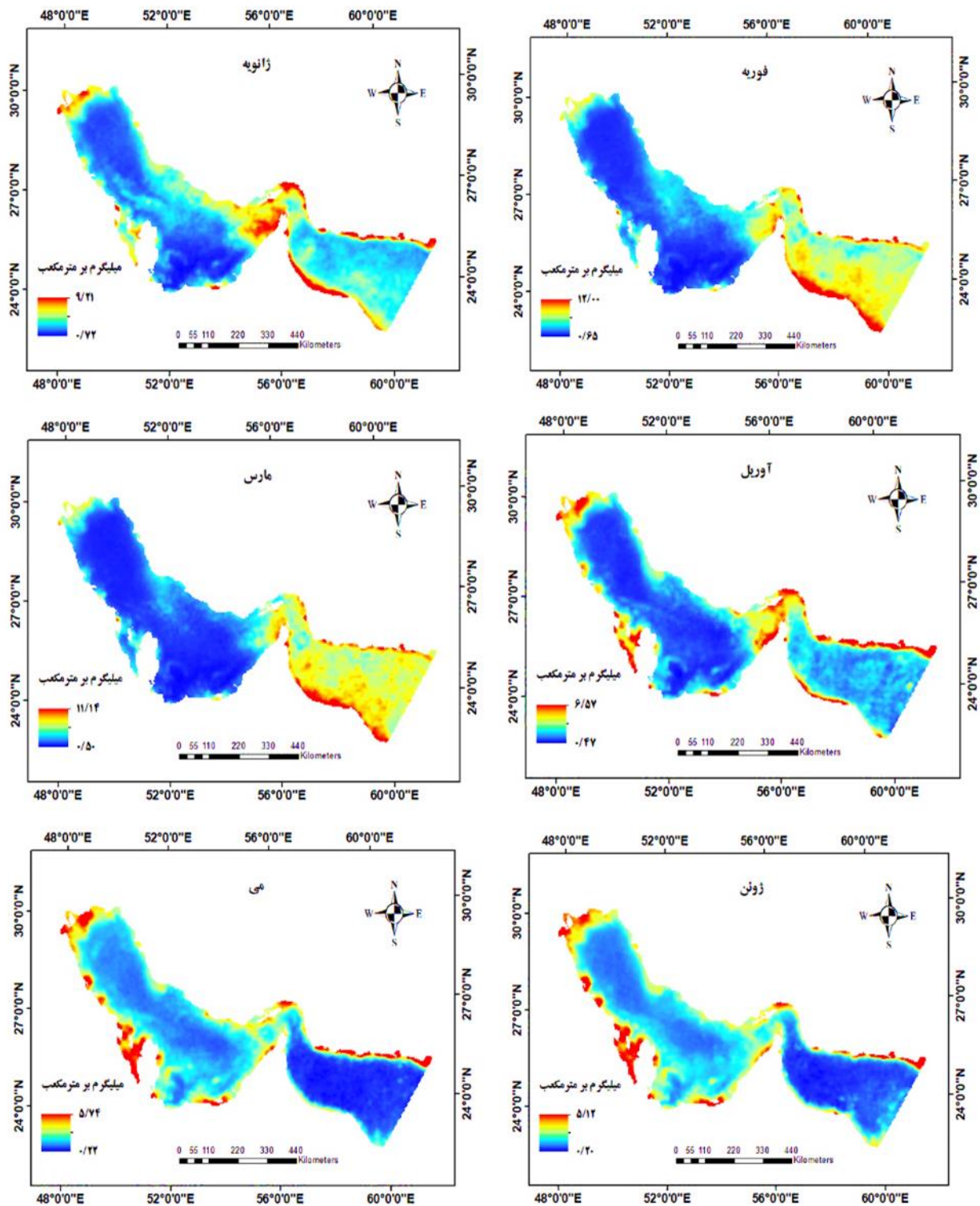
نتایج

شکل ۲ نشان می‌دهد که غلظت کلروفیل a در قسمت مرکزی نسبتاً کم ($0/72$ تا $1/15$ میلی‌گرم بر متر مکعب) و در مناطق ساحلی نسبتاً زیاد ($1/93$ تا $8/41$ میلی‌گرم بر متر مکعب) می‌باشند و به طور کلی تغییرات غلظت کلروفیل a در کل دوره کاهشی بوده است.

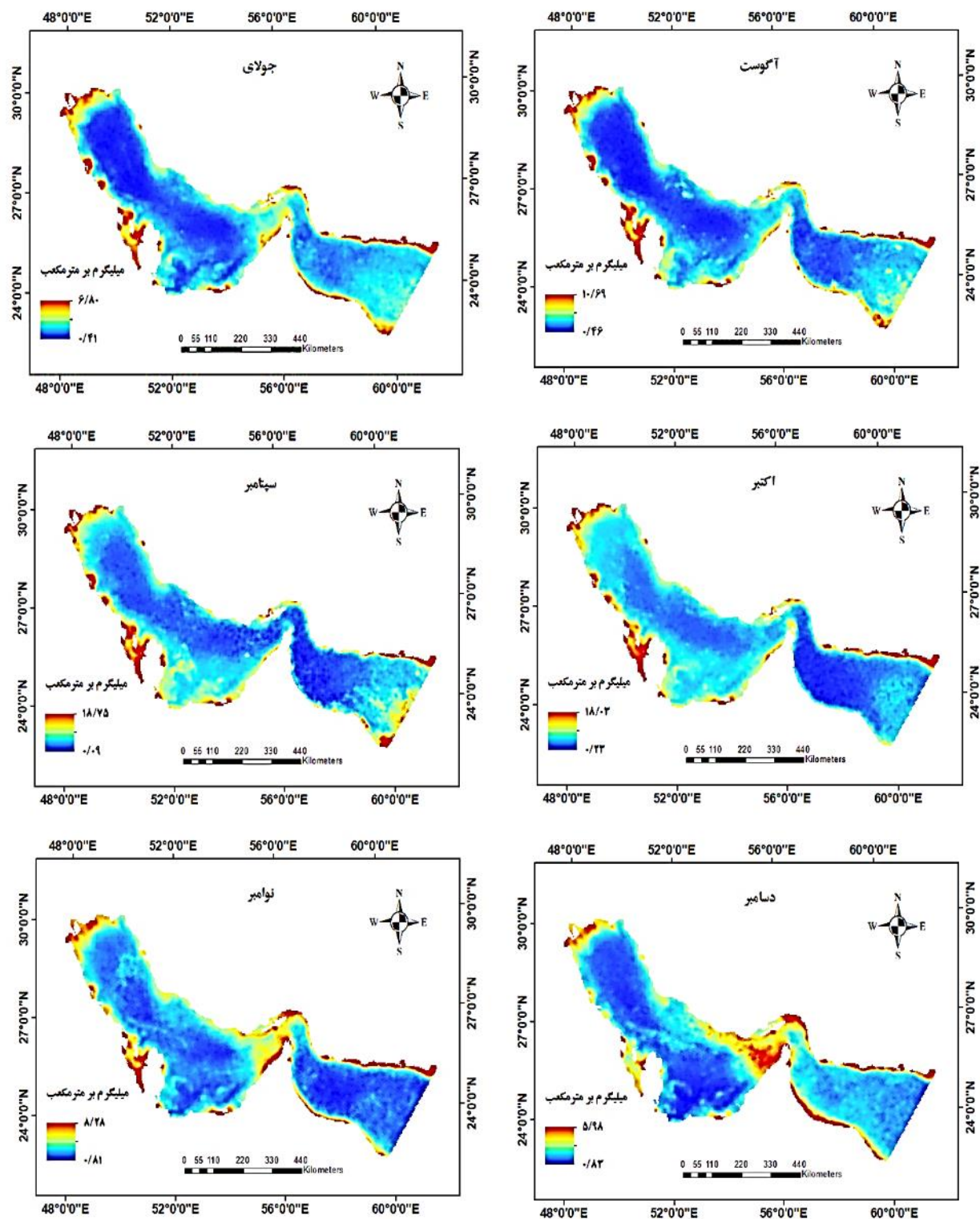


شکل ۲. نقشه میانگین غلظت کلروفیل a (میلیگرم بر مترمکعب) خلیج فارس و دریای عمان در کل دوره مطالعه

شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند که غلظت کلروفیل a به تدریج از اواخر تابستان تا اوایل پاییز با حداکثر مقدار در ماه دسامبر (0.09 تا $18/75$ میلیگرم بر متر مکعب) تا اکتبر (0.23 تا $18/03$ میلیگرم بر متر مکعب) و با شدت کمتر در فوریه (0.65 تا $12/00$ میلیگرم بر متر مکعب) افزایش یافته است. غلظت کلروفیل a در اواخر بهار و اوایل تابستان در ماه می (0.22 تا $5/74$ میلیگرم بر متر مکعب) و ژوئن (0.20 تا $5/12$ میلیگرم بر متر مکعب) به حداقل مقدار خود رسیده است و پیک تابستانی بیشتر در جنوب و شمال غربی (محل ورود رودخانه‌ها به دریا) دیده می‌شود. میانگین غلظت کلروفیل a دریای عمان در فوریه و مارس نسبت به خلیج فارس بالاتر بوده و پراکنش مکانی غلظت کلروفیل a در فوریه و مارس مشابه یکدیگر می‌باشند. در مناطق کم‌عمق غربی و جنوبی حداقل غلظت کلروفیل a در ماه‌های فوریه و مارس مشاهده شد. شکل ۵ نشان می‌دهد که غلظت کلروفیل a (-0.04 تا 0.03 میلیگرم بر متر مکعب بر سال) در بیشتر مناطق روند پایدار و نسبتاً کاهشی در طول دوره داشته اما در برخی از قسمت‌های سواحل خلیج فارس روند افزایش اندکی را ثبت کرده است. روند تغییرات غلظت کلروفیل a در کل منطقه معنی‌دار نیست. شکل ۶ نشان می‌دهد که روند تغییرات غلظت کلروفیل a در طول دوره معنی‌داری نبوده است. روند تغییرات غلظت کلروفیل a و معنی‌دار بودن آن‌ها در ماه‌های مختلف سال در شکل ۷ و ۸ در جدول ۱ شرح داده شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که در ماه ژانویه در قسمت‌های مرکزی خلیج فارس، تنگه هرمز و سواحل جنوبی دریای عمان روند معنی‌دار بوده است. در ماه فوریه در سواحل خلیج فارس و در ماه مارس در اکثر قسمت‌های دریای عمان و در ماه آوریل در قسمت شمال غربی خلیج فارس روند معنی‌دار بوده است. در ماه می در قسمت‌های مرکزی خلیج فارس و در ماه‌های ژوئن و جولای در قسمت‌های شمال غربی خلیج فارس، تنگه هرمز و قسمت‌های از سواحل دریای عمان روند تغییرات غلظت کلروفیل a معنی‌دار بوده است. در ماه آگوست در قسمت‌های غربی و شمال شرقی خلیج فارس و در ماه سپتامبر در قسمتی از سواحل و شمال شرقی خلیج فارس روند مثبت بوده است. در ماه نوامبر در بخش‌های از تنگه هرمز و در ماه دسامبر در اکثر قسمت‌های دریای عمان و بخشی از مناطق مرکزی خلیج فارس روند معنی‌دار بوده است.



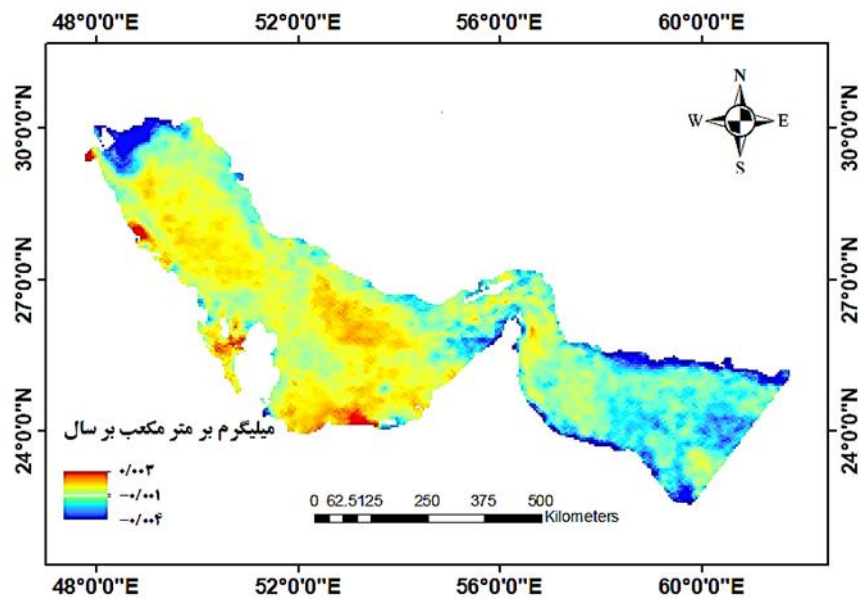
شکل ۳. نقشه میانگین ماهانه غلظت کلروفیل a (میلیگرم بر متر مکعب) خلیج فارس و دریای عمان در شش ماهه اول سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸



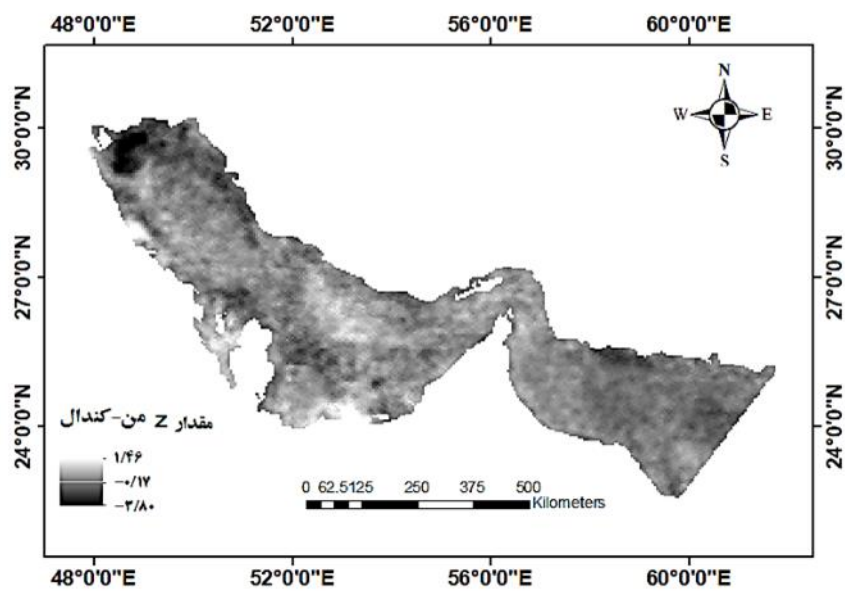
شکل ۴. نقشه میانگین ماهانه غلظت کلروفیل *a* (میلیگرم بر متر مکعب) خلیج فارس و دریای عمان در شش ماهه دوم سال‌های ۲۰۰۳ تا

جدول ۱. شیب روند تغییرات غلظت کلروفل a خلیج فارس و دریای عمان
در ماه‌های مختلف سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸

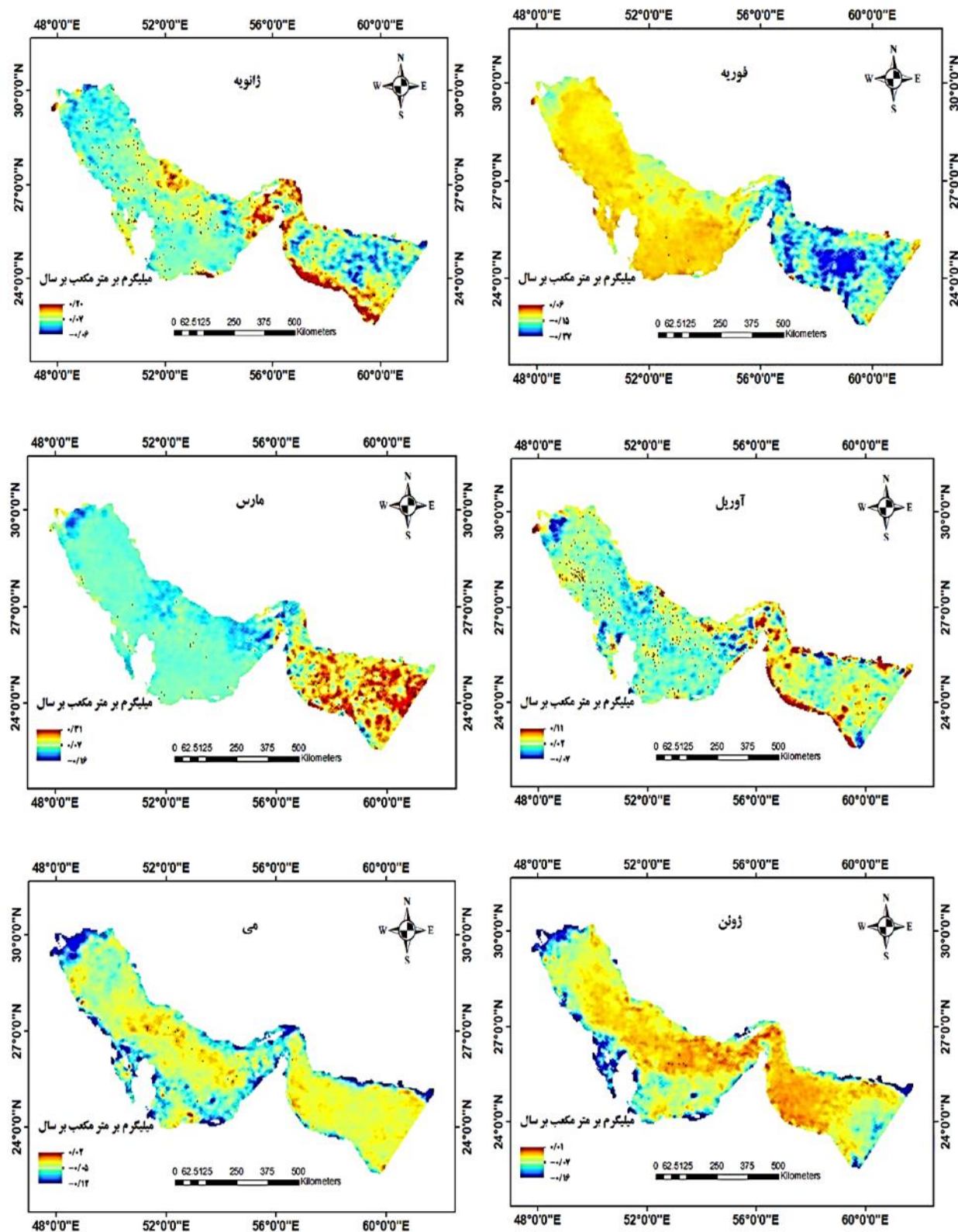
ماه	شیب روند	معنی‌داری
ژانویه	شیب صعودی تغییرات در بخشی از سواحل شمالی خلیج فارس و همچنین سواحل جنوبی دریای عمان ($0/01$ تا $0/2$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	*
فوریه	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق ($0/37$ - تا $0/06$ - میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	
مارس	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق خلیج فارس ($0/16$ - تا $0/12$ - میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال) و شیب صعودی تغییرات غلظت کلروفل a در دریای عمان ($0/12$ تا $0/31$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	*
آوریل	شیب صعودی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق دریای عمان ($0/06$ تا $0/11$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	*
می	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق خلیج فارس و دریای عمان ($0/12$ - تا $0/02$ - میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	
ژوئن	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق ($0/16$ - تا $0/02$ - میلی‌گرم بر متر مکعب)	
جولای	شیب صعودی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق دریای عمان ($0/02$ تا $0/05$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	
اگوست	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a در بخشی از سواحل غربی در امتداد سواحل عربستان سعودی و مناطق کم‌عمق بین سواحل قطر و امارات ($0/19$ - تا $0/02$ - میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	
سپتامبر	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a ($0/51$ - تا $0/02$ - میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال) در اکثر مناطق دریای عمان و شیب صعودی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر قسمت‌های ساحلی خلیج فارس ($0/06$ تا $0/18$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	
اکتبر	شیب صعودی تغییرات غلظت کلروفل a در برخی از قسمت‌های شمال غربی و مرکزی خلیج فارس و همچنین بخش‌های از تنگه هرمز ($0/01$ تا $0/07$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	*
نوامبر	شیب نزولی تغییرات غلظت کلروفل a در اکثر مناطق ($0/16$ - تا $0/01$ - میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)	
دسامبر	شیب صعودی تغییرات غلظت کلروفل a در مناطق مرکزی و شمال غربی خلیج فارس ($0/02$ تا $0/58$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال)، تنگه هرمز ($0/01$ تا $0/13$ میلی‌گرم بر متر مکعب بر سال) و اکثر مناطق دریای عمان ($0/01$ تا $0/13$ میلی‌گرم بر متر مکعب)	*



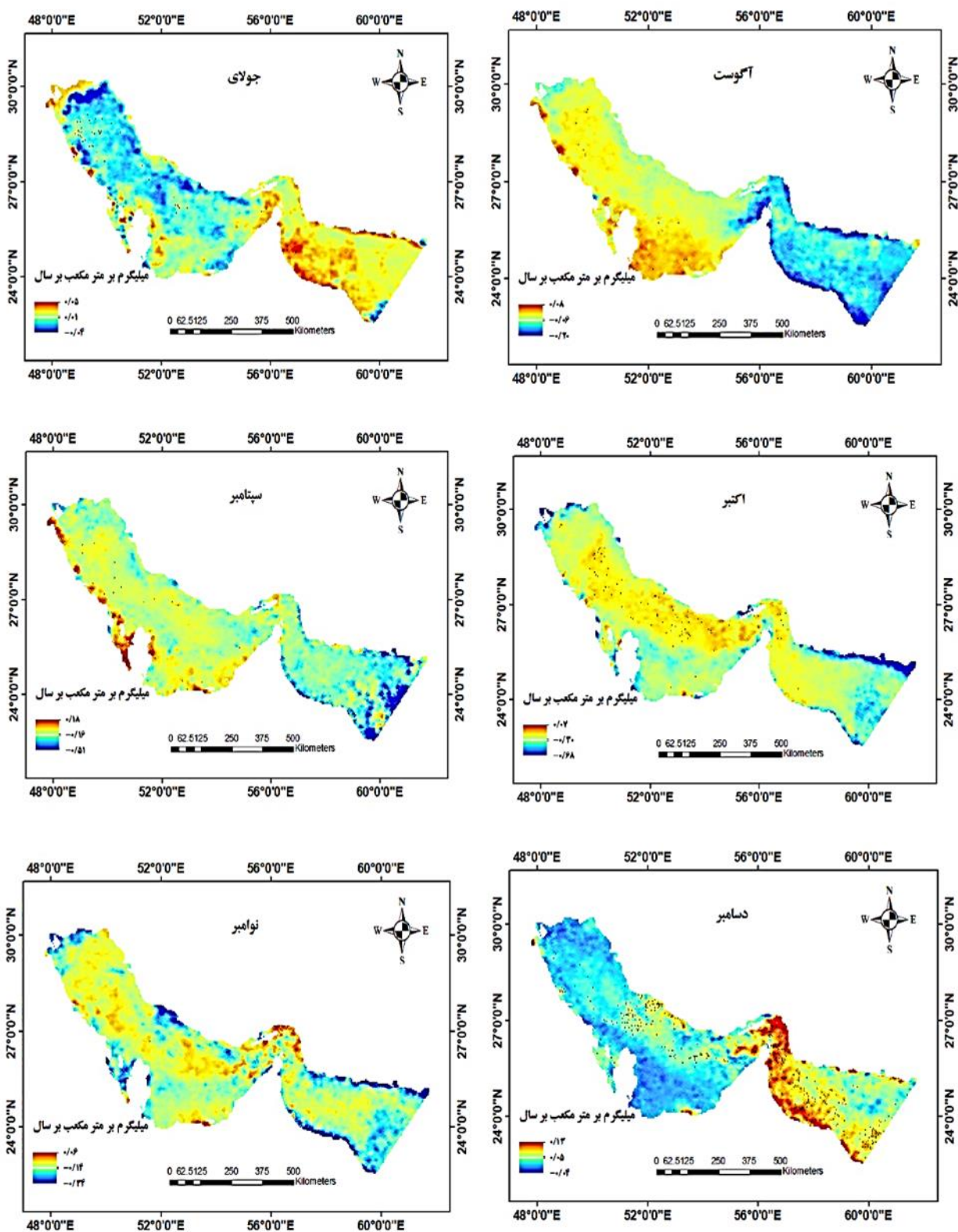
شکل ۵. نقشه سنس استیمیتور غلظت کلروفیل a (میلیگرم بر متر مکعب بر سال) در خلیج فارس و دریای عمان در کل دوره مطالعه



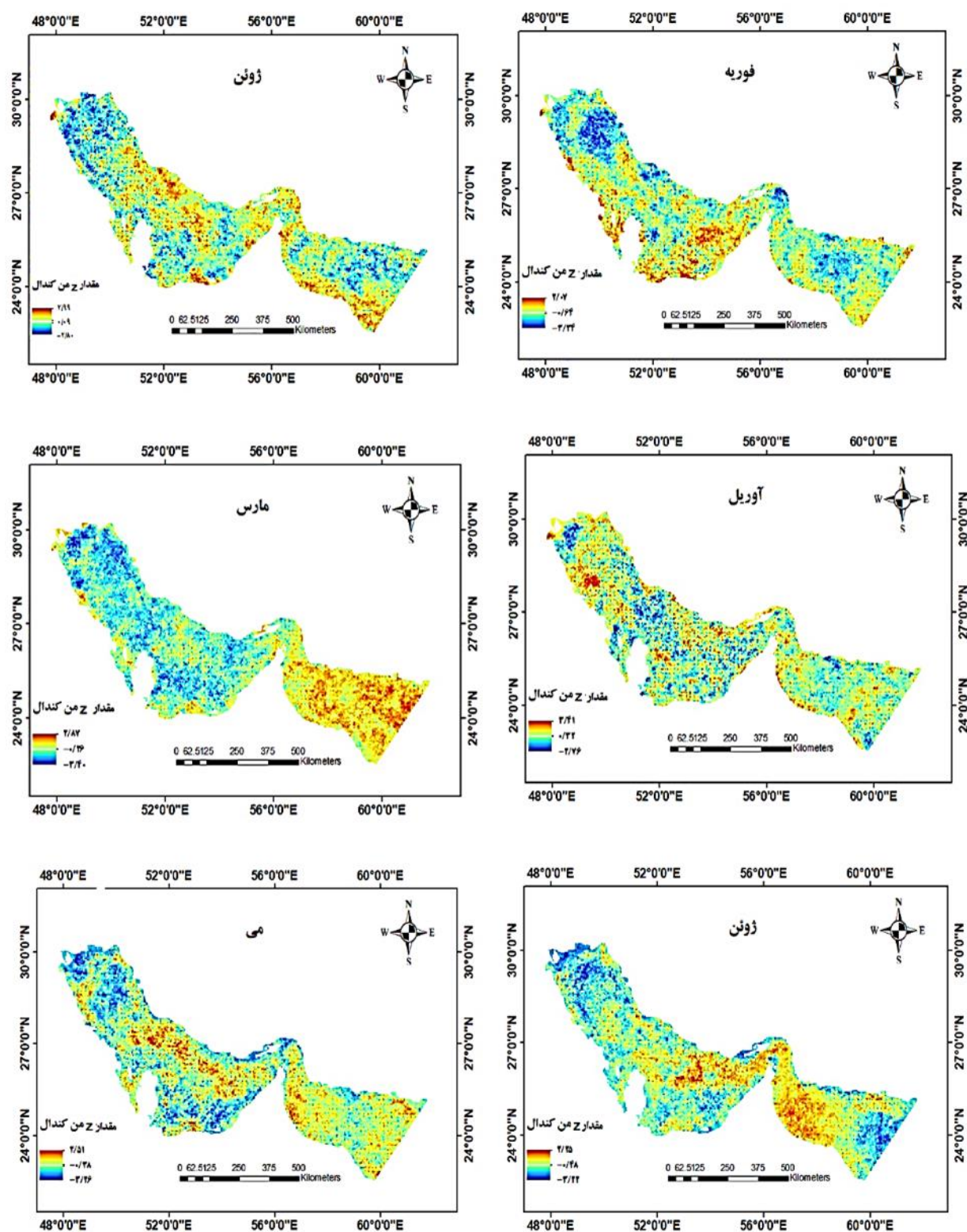
شکل ۶. نقشه تغییرات مکانی مقدار Z من-کنداال غلظت کلروفیل a در خلیج فارس و دریای عمان در کل دوره مطالعه



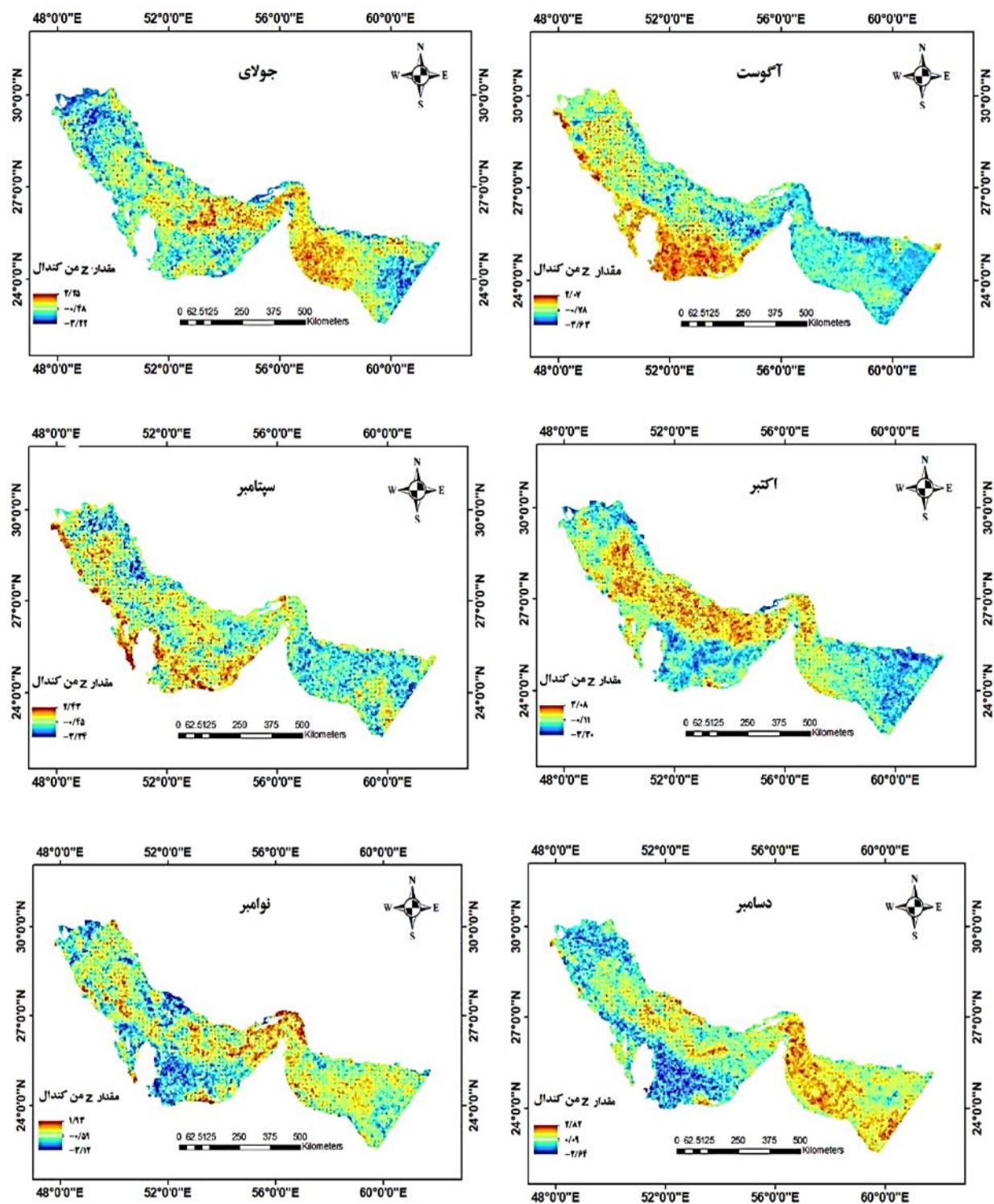
شکل ۷. نقشه سنس استیمیتور ماهانه غلظت کلروفیل a (میلیگرم بر مترمکعب بر سال) خلیج فارس و دریای عمان. در شش ماهه اول سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح پنج درصد ($p < 0.05$)



شکل ۸: نقشه سنس استیمیتور ماهانه غلظت کلروفیل a (میلیگرم بر مترمکعب بر سال) خلیج فارس و دریای عمان در شش ماهه دوم سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸. نقاط سیاه رنگ نشان دهنده معنی‌داری در سطح پنج درصد ($p < 0.05$)



شکل ۹. نقشه تغییرات مکانی مقدار Z من کندانال غلظت کلروفیل a خلیج فارس و دریای عمان در شش ماهه اول سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸



شکل ۱۰. نقشه تغییرات مکانی مقدار Z من کندیال غلظت کلروفیل a خلیج فارس و دریای عمان در شش ماهه دوم سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸

بحث

طبق نتایج تحقیق حاضر غلظت کلروفیل *a* در فصل پاییز و زمستان نسبت به بهار و تابستان بیشتر بوده است، این چرخه فصلی را می‌توان به عنوان یک الگوی فصلی مواد مغذی اقیانوس‌های نیمه‌گرمسیری، جایی که رشد فیتوپلانکتون‌ها به دلیل کمبود مواد مغذی محدود می‌شود، در نظر گرفت [۶۳]. پیکنوکلاین (لایه‌ای با بیشترین چگالی در آب) قوی ناشی از تشعشعات سطح و شوری بالا در لایه پایینی در بخش‌های عمیق‌تر خلیج فارس مشاهده شده است [۶۵، ۶۴]. در این مناطق، پیکنوکلاین در اواخر پاییز - اوایل زمستان وجود ندارد، بنابراین ستون آب کاملاً مخلوط شده و منجر به افزایش انتقال مواد مغذی به سطح و رشد فیتوپلانکتون‌ها می‌شود [۳۷]. مناطق ساحلی به دلیل عمق کم، بالا بودن کدورت و رسوبات معلق نسبت به مناطق دور از ساحل دارای مقدار غلظت کلروفیل *a* بیشتری می‌باشد [۶۵]. در حالی که نور و مواد مغذی به عنوان دو عامل عمده محدودکننده رشد در فیتوپلانکتون‌ها در نظر گرفته می‌شود، اما در مناطق کم‌عمق، اختلاط عمودی تحت تأثیر بادهای شمال لایه‌بندی ستون آب را تغییر می‌دهد و آب غنی‌تر و سردتر در مناطق عمیق‌تر را به لایه‌های فوقانی انتقال می‌دهد [۳۳]. آب‌های شیرین از طریق رودخانه‌های دجله، فرات و کارون در شمال غربی به خلیج فارس جریان می‌یابند که حداکثر تخلیه در اواخر بهار - اوایل تابستان است [۳۴]. تنش باد و آشفته‌گی جزر و مدی تأثیر قابل توجهی بر شوری و غلظت کلروفیل *a* ستون آب در مناطق کم‌عمق (عمق کمتر از ۱۰ متر) در قسمت‌های شمال غربی و جنوبی دارد [۶۷، ۶۶].

میانگین غلظت کلروفیل *a* دریای عمان در طی ۱۶ سال مورد مطالعه در فوریه و مارس نسبت به خلیج فارس بیشتر و پراکنش مکانی غلظت کلروفیل *a* در فوریه و مارس مشابه یکدیگر بودند. در قسمت شرقی (تنگه‌هرمز و دریای عمان)، کلروفیل *a* یک شکوفایی بهاره را با حداکثر در فوریه و مارس و حداقل در ژوئن، به وضوح نشان می‌دهد. دلایل این شکوفایی ظاهراً پیچیده است و مربوط به اثر ترکیبی فراچاهندگی فصلی ناشی از مانسون تابستانی همراه با تبادل آب بین خلیج فارس و دریای عمان می‌باشد. تا حدی خروج رودخانه از سواحل شمالی نیز می‌تواند بر دینامیک کلروفیل در تنگه‌هرمز تأثیر بگذارد [۶۸].

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که روند کلی تغییرات غلظت کلروفیل *a* در طی ۱۶ سال مورد مطالعه در اکثر مناطق به ویژه بخش‌های مرکزی شیب تغییرات نزولی و فاقد معنی‌داری و در بخش‌های از سواحل سعودی و معنی‌دار بودند. نتایج مطالعه حاضر در مورد شیب تغییرات ماهانه غلظت کلروفیل *a* شان داد که در ماه ژانویه در قسمتی از سواحل خلیج فارس و دریای عمان و همچنین در ماه دسامبر در قسمت‌های از خلیج فارس، تنگه‌هرمز و اکثر قسمت‌های دریای عمان شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* سعودی و معنی‌دار بودند. در ماه فوریه، مارس، ژوئن و نوامبر شیب تغییرات در اکثر مناطق نزولی و فاقد معنی‌داری بود. در ماه مارس و جولای در اکثر قسمت‌های خلیج فارس شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* نزولی، ولی در دریای عمان در بیشتر مناطق سعودی و معنی‌دار بودند. البته در ماه جولای شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* معنی‌دار نبودند. در ماه سپتامبر در اکثر مناطق دریای عمان شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* نزولی ولی در اکثر قسمت‌های ساحلی خلیج فارس شیب تغییرات سعودی و فاقد معنی‌داری و در برخی از قسمت‌ها این تغییرات معنی‌دار بودند. در ماه آوریل در اکثر مناطق دریای عمان شیب تغییرات سعودی و معنی‌دار و در قسمت‌های از خلیج فارس شیب تغییرات نزولی و معنی‌دار بودند. در ماه آگوست در قسمتی از سواحل و مناطق کم‌عمق شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* نزولی و در اکثر مناطق این تغییرات معنی‌داری نبودند. در ماه اکتبر در برخی از قسمت‌های خلیج فارس و همچنین قسمت‌های از تنگه‌هرمز شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* سعودی و معنی‌دار بودند. شیب تغییرات غلظت کلروفیل *a* در دریای عمان در بیشتر ماه‌های سال معنی‌دار نبودند و بیشترین معنی‌داری در خلیج فارس در فصل بهار و زمستان مشاهده شد. نتایج یک مطالعه در خلیج فارس نشان داد که اقلیم‌شناسی روند ماهانه و سالانه غلظت کلروفیل *a* قسمت‌های شمال غربی و ورودی رودخانه همبستگی معنی‌دار با میانگین جریان رودخانه و روند تخلیه رسوب رودخانه‌های شمال غربی دارد. میانگین ورودی رودخانه در سپتامبر تا اکتبر به حداکثر مقدار خود هم‌زمان با ماکزیمم غلظت کلروفیل *a* در سپتامبر می‌رسد.

در پژوهشی که در منطقه خلیج فارس انجام گرفت، نتایج نشان داد که غلظت کلروفیل a دارای حداکثر مقادیر در پاییز و حداقل مقادیر در بهار است [۳۰] و همچنین در تحقیق دیگری در منطقه خلیج فارس و دریای عمان به این نتیجه رسیدند که غلظت کلروفیل a در فصل پاییز و زمستان نسبت به بهار و تابستان بیشتر بوده است [۶۵]. نتایج این تحقیقات با نتایج تحقیق حاضر در مورد غلظت کلروفیل a در فصول مختلف که در منطقه خلیج فارس و دریای عمان انجام شده است مشابهت داشته است. در مطالعه حاضر تعیین دقیق پیکسل به پیکسل غلظت کلروفیل a ، تعیین دقیق روند، معنی داری غلظت کلروفیل a و آنالیزهای مبتنی بر معیارهای آماری برای هر پیکسل صورت گرفته است. یکی از محدودیت‌های اصلی مطالعه، داده‌های از دست رفته کلروفیل a حاصل از نبود مشاهدات به علت هوای ابری، گردوغبار، زاویه دید نامناسب ماهواره است. حتی اگر یک تکنیک مناسب برای پر کردن داده‌های مفقوده دنبال شود، مقدار نسبتاً زیادی از داده‌های از دست رفته می‌تواند باعث عدم قطعیت در نتایج تحقیق و پژوهش شود.

نتیجه‌گیری

حداکثر غلظت ماهانه، الگوی متفاوتی را در محل تخلیه رودخانه و پهنه‌های عمیق‌تر نشان داد. حداکثر مقادیر کلروفیل a در اواخر تابستان - اوایل پاییز و در زمستان در مناطق کم‌عمق مشاهده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روند و تغییرات مقادیر غلظت کلروفیل a از نظر مکانی متغیر است و روند تغییرات آن در ۱۶ سال مورد مطالعه کاهشی و فاقد معنی داری بوده است. در بخش‌های مختلف منطقه توزیع کلروفیل a عمدتاً به خروجی رودخانه‌ها، گردش آب و رژیم‌های اقلیمی مربوط می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: مورد خاصی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: مورد خاصی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Barocio-León O, Millán-Núñez R, Santamaría-del-Ángel E, González-Silvera A. Productividad primaria del fitoplancton en la zona eufótica del Sistema de la Corriente de California estimada mediante imágenes del CZCS. Ciencias marinas. 2007;33(1):59-72.
- 2- Chavez FP, Messié M, Pennington JT. Marine primary production in relation to climate variability and change. Annual review of marine science. 2011; 3:227-60.
- 3- Verdugo-Díaz G, Martínez-López A, Gaxiola-Castro G, Valdez-Holguín JE. Phytoplankton photosynthetic parameters from the Gulf of California southern region. Revista de Biología Marina y Oceanografía. 2012;47(3):527-35.
- 4- Lara JRL, Núñez RM, Osorio JLL, Guzmán CB. Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño, en la parte central del Golfo de California durante primavera, 1985. Ciencias Marinas. 1993;19(2):137-54.
- 5- Winder M, Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate. Hydrobiologia. 2012;698(1):5-16.
- 6- Castro GG. Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California: Instituto Nacional de Ecología.
- 7- Boyce DG, Lewis MR, Worm B. Global phytoplankton decline over the past century. Nature. 2010;466(7306):591-6.
- 8- Boyce DG, Dowd M, Lewis MR, Worm B. Estimating global chlorophyll changes over the past century. Progress in Oceanography. 2014; 122:163-73.
- 9- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb KM, Franks P, Chhak K, Miller AJ, et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. Geophysical Research Letters. 2008;35(8).
- 10- Martinez E, Antoine D, D'Ortenzio F, Gentili B. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. Science. 2009;326(5957):1253-6.
- 11- Racault M-F, Sathyendranath S, Brewin RJ, Raitsos DE, Jackson T, Platt T. Impact of El Niño variability on oceanic phytoplankton. Frontiers in Marine Science. 2017; 4:133.

- 12- Lan K-W, Evans K, Lee M-A. Effects of climate variability on the distribution and fishing conditions of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western Indian Ocean. *Climatic Change*. 2013;119(1):63-77.
- 13- Taboada FG, Barton AD, Stock CA, Dunne J, John JG. Seasonal to interannual predictability of oceanic net primary production inferred from satellite observations. *Progress in Oceanography*. 2019; 170:28-39.
- 14- Sathyendranath S, Brewin RJ, Brockmann C, Brotas V, Calton B, Chuprin A, et al. An ocean-colour time series for use in climate studies: the experience of the ocean-colour climate change initiative (OC-CCI). *Sensors*. 2019;19(19):4285.
- 15- Montes-Hugo M, Doney SC, Ducklow HW, Fraser W, Martinson D, Stammerjohn SE, et al. Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the western Antarctic Peninsula. *Science*. 2009;323(5920):1470-3.
- 16- Arrigo KR, van Dijken GL. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in oceanography*. 2015; 136:60-70.
- 17- Yu Y, Xing X, Liu H, Yuan Y, Wang Y, Chai F. The variability of chlorophyll-*a* and its relationship with dynamic factors in the basin of the South China Sea. *Journal of Marine Systems*. 2019; 200:103230.
- 18- Gregg WW, Casey NW, McClain CR. Recent trends in global ocean chlorophyll. *Geophysical research letters*. 2005;32(3).
- 19- Siegel DA, Behrenfeld MJ, Maritorena S, McClain CR, Antoine D, Bailey SW, et al. Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission. *Remote Sensing of Environment*. 2013; 135:77-91.
- 20- Legaard KR, Thomas AC. Spatial patterns in seasonal and interannual variability of chlorophyll and sea surface temperature in the California Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006;111(C6).
- 21- Gohin F, Saulquin B, Oger-Jeanneret H, Lozac'h L, Lampert L, Lefebvre A, et al. Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-*a* concentrations. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(8):3329-40.
- 22- Philippart CJM, van Iperen JM, Cadée GC, Zuur AF. Long-term field observations on seasonality in chlorophyll-*a* concentrations in a shallow coastal marine ecosystem, the Wadden Sea. *Estuaries and Coasts*. 2010;33(2):286-94.
- 23- Liu D, Chen C, Gong J, Fu D. Remote sensing of chlorophyll-*a* concentrations of the Pearl River estuary from MODIS land bands. *International Journal of Remote Sensing*. 2010;31(17-18):4625-33.
- 24- Leboutteiller A, Herbland A. Diel variation of chlorophyll-*a* as evidenced from a 13-day station in the equatorial atlantic-ocean. *Oceanologica Acta*. 1982; 5(4):433-41.
- 25- Mercado JM, Ramírez T, Cortés D, Sebastián M, Reul A, Bautista B. Diurnal changes in the bio-optical properties of the phytoplankton in the Alborán Sea (Mediterranean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2006;69(3-4):459-70.
- 26- Holm-Hansen O, Naganobu M, Kawaguchi S, Kameda T, Krasovski I, Tchernyshkov P, et al. Factors influencing the distribution, biomass, and productivity of phytoplankton in the Scotia Sea and adjoining waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004;51(12-13):1333-50.
- 27- Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of climate*. 2002;15(13):1609-25.
- 28- Kwarteng AY, Mozumder C, editors. Monitoring chlorophyll-*a* and sea surface temperature variations in SE Arabian Gulf and NW Sea of Oman from MODIS Aqua data. *Proceedings of 37th Asian conference on remote sensing*, Colombo, Sri Lanka; 2016.
- 29- Moradi M, Kabiri K. Spatio-temporal variability of SST and Chlorophyll-*a* from MODIS data in the Persian Gulf. *Marine pollution bulletin*. 2015;98(1-2):14-25.
- 30- Anderson DM, Cembella AD, Hallegraeff GM. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual review of marine science*. 2012; 4:143-76.
- 31- Moradi M. Trend analysis and variations of sea surface temperature and chlorophyll-*a* in the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*. 2020; 156:111267.
- 32- Hussein KA, Al Abdouli K, Ghebreyesus DT, Petchprayoon P, Al Hosani N, O Sharif H. Spatiotemporal Variability of Chlorophyll-*a* and Sea Surface Temperature, and Their Relationship with Bathymetry over the Coasts of UAE. *Remote Sensing*. 2021; 13(13):2447.
- 33- Al Kaabi M, Zhao J, Ghedira H. MODIS-based mapping of Secchi disk depth using a qualitative algorithm in the shallow Arabian Gulf. *Remote Sensing*. 2016;8(5):423.
- 34- Selkoe KA, Bruno JF, Selig ER, Watson R. A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems.
- 35- Quigg A, Al-Ansi M, Al Din NN, Wei C-L, Nunnally CC, Al-Ansari IS, et al. Phytoplankton along the coastal shelf of an oligotrophic hypersaline environment in a semi-enclosed marginal sea: Qatar (Arabian Gulf). *Continental Shelf Research*. 2013; 60:1-16.

- 36- Sheppard C, Al-Husiani M, Al-Jamali F, Al-Yamani F, Baldwin R, Bishop J, et al. The Gulf: a young sea in decline. *Marine Pollution Bulletin*. 2010;60(1):13-38.
- 37- Boyer JN, Kelble CR, Ortner PB, Rudnick DT. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. *Ecological indicators*. 2009;9(6): S56-S67.
- 38- Hattab T, Jamet C, Sammari C, Lahbib S. Validation of chlorophyll- α concentration maps from Aqua MODIS over the Gulf of Gabes (Tunisia): Comparison between MedOC3 and OC3M bio-optical algorithms. *International Journal of Remote Sensing*. 2013;34(20):7163-77.
- 39- Barzandeh A, Eshghi N, Hosseinibalam F, Hassanzadeh S. Wind-driven coastal upwelling along the northern shoreline of the Persian Gulf. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2018;59(3).
- 40- Zhao J, Ghedira H. Monitoring red tide with satellite imagery and numerical models: A case study in the Arabian Gulf. *Marine pollution bulletin*. 2014;79(1-2):305-13.
- 41- Emery KO. Sediments and water of Persian Gulf. *AAPG Bulletin*. 1956;40(10):2354-83.
- 42- Vaughan GO, Al-Mansoori N, Burt JA. The arabian gulf. *World seas: An environmental evaluation*: Elsevier; 2019. p. 1-23.
- 43- Reynolds RM. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*. 1993; 27:35-59.
- 44- Al Senafi F, Anis A. Shamals and climate variability in the Northern Arabian/Persian Gulf from 1973 to 2012. *International journal of climatology*. 2015;35(15):4509-28.
- 45- Racault M-F, Sathyendranath S, Brewin RJ, Raitsos DE, Jackson T, Platt T. Impact of El Niño variability on oceanic phytoplankton. *Frontiers in Marine Science*. 2017; 4:133.
- 46- ROMPE. 2003. Regional report of the state of the marine environment (ROMPE sea area). (In Persian).
- 47- Grafton RQ, Hilborn R, Squires D, Williams M, Tait M. *Handbook of marine fisheries conservation and management*: OUP USA; 2010.
- 48- Jawad LA. *Dangerous Fishes of the Eastern and Southern Arabian Peninsula*. 2019.
- 49- Chaichitehrani N, Allahdadi MN. Overview of wind climatology for the Gulf of Oman and the northern Arabian Sea. *American Journal of Fluid Dynamics*. 2018;8(1):1-9.
- 50- Khosravi Y, Bahri A. Use of spatial statistics techniques in order to spatio-temporal variations of chlorophyll a concentration in the Persian Gulf. 3. 2018; 10 (1) :33-46. (In Persian).
- 51- Miles TN, He R, Li M. Characterizing the South Atlantic Bight seasonal variability and cold-water event in 2003 using a daily cloud-free SST and chlorophyll analysis. *Geophysical research letters*. 2009;36(2).
- 52- Volpe G, Nardelli BB, Cipollini P, Santoleri R, Robinson IS. Seasonal to interannual phytoplankton response to physical processes in the Mediterranean Sea from satellite observations. *Remote Sensing of Environment*. 2012; 117:223-35.
- 53- Sirjacobs D, Alvera-Azcárate A, Barth A, Lacroix G, Park Y, Nechad B, et al. Cloud filling of ocean colour and sea surface temperature remote sensing products over the Southern North Sea by the Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions methodology. *Journal of Sea Research*. 2011;65(1):114-30.
- 54- Nikolaidis A, Georgiou GC, Hadjimitsis D, Akylas E. Filling in missing sea-surface temperature satellite data over the Eastern Mediterranean Sea using the DINEOF algorithm. *Central European Journal of Geosciences*. 2014;6(1):27-41.
- 55- Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*. 2013; 100:172-82.
- 56- Kendall MG. *Rank correlation methods*. 1948.
- 57- Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*. 1945:245-59.
- 58- Bouza-Deaño R, Ternero-Rodríguez M, Fernández-Espinosa A. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain). *Journal of hydrology*. 2008;361(3-4):227-39.
- 59- Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*. 1968;63(324):1379-89.
- 60- Hollander M, Wolfe D. *Nonparametric statistical methods* John Wiley. New York pp. 1973.
- 61- Gilbert RO. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*: John Wiley & Sons; 1987.
- 62- Nezlin NP, Polikarpov IG, Al-Yamani FY, Rao DS, Ignatov AM. Satellite monitoring of climatic factors regulating phytoplankton variability in the Arabian (Persian) Gulf. *Journal of Marine Systems*. 2010;82(1-2):47-60.
- 63- Abdelrahman SM. Seasonal variations of sound speed in the Arabian Gulf. *Oceanologica acta*. 1998;21(1):59-68.
- 64- Swift SA, Bower AS. Formation and circulation of dense water in the Persian/Arabian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003;108(C1):4-1-4-21.

- 65- Gholamalifad M, Ahmadi B, Nouri P. Remote Sensing Monitoring of Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a Variability in the Persian Gulf and Oman Sea: Influential Factors on Net Primary Production. Fisheries Science and Technology. 2020;9(4):305-33. (In Persian).
- 66- Jones PD, Briffa KR. Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 1, spatial, temporal and seasonal details. The Holocene. 1992;2(2):165-79.
- 67- Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. Journal of climate. 2002;15(13):1609-25.
- 68- Nezlin NP, Polikarpov IG, Al-Yamani F. Satellite-measured chlorophyll distribution in the Arabian Gulf: Spatial, seasonal and inter-annual variability. International Journal of Oceans and Oceanography. 2007;2(1):139-56.

Analysis of trends and spatial and temporal variability of chlorophyll *a* concentration in the Persian Gulf and Oman Sea

Maryam Karimian¹, Omid Beyraghdar Kashkooli^{1*}, Reza Modarres¹, Saeid Pourmanafi¹

1. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ABSTRACT

Chl *a* is the main pigment of phytoplankton, which is an indicator of phytoplankton biomass and reflects the primary production in the marine environment. In this study, level 3 (4 km) data of Chl *a* concentration of Persian Gulf and Oman Sea for the period of 2003- 2018 were used. The data was converted to raster format in ArcGIS10.5 environment and then the numerical values of each pixel were extracted in R (version 4.0.2). Missing data were observed in Chl *a* data, to solve this problem, DINEOF algorithm was applied and non-parametric Mann-Kendall and Sen's Stimulator tests were used to analyze Chl *a* concentration trends. The results showed that the maximum concentration of Chl *a* is in September (0.09 to 18.75 mg / m³) and October (0.23 to 18.03 mg / m³) and the minimum concentration of Chl *a* in May (0.22 to 5.74 mg / m³) and June (0.20 to 5.12 mg / m³). The trend of Chl *a* concentration variability over the study period was negative in most areas and not significant. These analyses provide an overall description of Chl *a* concentration variability in the Persian Gulf and Oman Sea based on satellite observations; however, further investigations based on *in situ* observations are needed to achieve better understanding of the patterns of Chl *a* concentration alterations.

KEYWORDS: Chl *a* concentration, Modis, Persian Gulf, Oman Sea, Mann-Kendall test

ARTICLE TYPE

Original Research

ARTICLE HISTORY

Received: 21 April 2022

Accepted: 6 September 2022

ePublished: 21 September 2022

* Corresponding Author:

Email address: omid.beyraghdar@iut.ac.ir