

## Study of the variability of the monthly average chlorophyll a in the Caspian Sea in the period 2010-2022 based on some physical parameters

Aliakbari-Bidokhti, A. A.<sup>1</sup>  | Bohluly, A.<sup>1</sup>  | Abbaszadeh Azar, H.<sup>1</sup> 

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: [bidokhti@ut.ac.ir](mailto:bidokhti@ut.ac.ir)

(Received: 3 March 2025, Revised: 22 April 2025, Accepted: 29 July 2025, Published online: 20 Sep 2025)

### Summary

Some of the algae bloom phenomena in marine environments are harmful and under increase due to climate change and marine degradation in most coastal areas of the world. Caspian Sea also is experiencing these phenomena, which can really harm this fragile ecosystem. In this paper, this phenomenon is studied for the Caspian Sea for the last decade. Data of sea surface color (as the concentration of chlorophyll), surface temperature, surface currents and surface winds data acquired from two sites, namely NASA and AVISO, including some data of surface color and temperature of MODIS satellite data have been used. Their spatial resolution is about half a degree and the time resolution is weekly for chlorophyll and sea surface temperature and surface currents data and monthly for wind data. Time series and spectra analyses were used to consider time and periodic variations of chlorophyll concentrations as well as surface currents in the middle and southern Caspian Sea. Some Hovmöller diagrams for the concentrations of the chlorophyll and currents are used to consider the maps of changes for the whole period of study.

The results show that these phenomena occur often in the last months of summer and some time in winter. It occurs almost extensively every one to two year and mainly starting in the northern basin of the Caspian Sea. The upwelling due to wind, especially in the eastern coastal areas of the Caspian Sea seems to be very important in this event. The surface circulation can transport and redistribute the chlorophyll produced by the events of algae bloom. It also appears that the number of blooms has slightly decreased in recent decade but its intensity seems to have increased. This is particularly so for the events between 2015 and 2020, in which September 2017 and 2018 has experienced strong outbreak of algae blooms that have spread into the southern Caspian Sea as well. In some cases, as in September 2017, it might have reached the southern coast of the Caspian Sea that could have harmed the coastal facilities and fisheries. These are well shown on the Hovmöller diagrams for chlorophyll concentrations and surface currents for the whole period of study in the Caspian Sea.

There are 4 yearly, yearly and seasonal variability in the occurrence of algae blooms and long cyclic changes of the variability may be due to the large scale and long period oscillation, as Enso in the atmosphere-ocean system. The spectra of Nini 3.4 also shows that some 4 to 5 years' cyclic variation exists in Enso signal. Although the Enso signal shows that following an El Nino event, there might be an algae bloom event in the Caspian Sea (as the event of September 2017). This is expected in face of present climate change and sea surface temperature increase in recent years.

**Keywords:** Algae bloom, Chlorophyll, Surface currents, Sea surface Temperature, wind, Caspian Sea.

Cite this article: Aliakbari-Bidokhti, A. A., Bohluly, A., & Abbaszadeh Azar, H. (2025). Study of the variability of the monthly average chlorophyll a in the Caspian Sea in the period 2010-2022 based on some physical parameters. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 431-451. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.391333.1007671>

E-mail: (1) [bohluly@ut.ac.ir](mailto:bohluly@ut.ac.ir) | [hamed.aabbaszade@ut.ac.ir](mailto:hamed.aabbaszade@ut.ac.ir)



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.391333.1007671>

Print ISSN: 2538-371X  
Online ISSN: 2538-3906

## بررسی تغییرپذیری میانگین ماهانه کلروفیل آ در دریای خزر در دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۰

## مبثنی بر برخی پارامترهای فیزیکی

عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۱</sup> | اصغر بهلولی<sup>۱</sup> | حامد عباسزاده آذر<sup>۱</sup>

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [bidokhti@ut.ac.ir](mailto:bidokhti@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۵/۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

## چکیده

هدف کار حاضر مطالعه تغییرپذیری میانگین ماهانه غلظت کلروفیل آ از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ به همراه دمای سطحی، باد و جریان سطحی (میانگین هفتگی، استخراج شده از داده‌های ارتفاع سنجی) در دریای خزر با کمک داده‌های ماهواره‌ای، با بررسی سری‌های زمانی، همبستگی‌ها، تحلیل طیفی و نمودارهای هافمولر، برای ماه‌هایی که با بیشترین شکوفایی جلبکی همراه با افزایش کلروفیل آ است، می‌باشد. بر اساس نتایج، بیشترین شکوفایی‌ها در اواخر ماه‌های گرم رخ می‌دهد (به‌ویژه در سپتامبر ۲۰۱۷). از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ شکوفایی جلبکی افزایشی بوده، ولی از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ غلظت آن کمی کاهش یافته است. در ماه‌های اوج شکوفایی، بادهای سطحی شمال شرقی بوده که انتقال اکمن جنوب-غرب سو را تقویت و فرایند فراچاهی را در سواحل شمال شرقی خزر ترغیب می‌کند. در فصل سرد نیز، با جهت باد عمدتاً جنوبی (فرارفت گرم)، شکوفایی ضعیف‌تر مشاهده شد. الگوی جریان‌ها با پیچک‌های میان‌مقیاس نیز نقشی مؤثر در انتقال افقی کلروفیل آ (در حد نامطلوب) به سواحل جنوب و غربی خزر دارند. به بیانی دیگر، کلروفیل آ تولیدشده در قسمت‌های شمال و مرکزی که در فصول گرم رخ می‌دهد، در اثر جریان‌ها به سواحل جنوب منتقل و موجب آسیب به شیلات و غیره می‌شود. غلظت کلروفیل آ (در تمام مقاله هر جا کلروفیل تنها آمده منظور کلروفیل آ است) در حوزه جنوبی هنگام شکوفایی فراگیر، حدود ۱۷ درصد مقدار میانگین آن در خزر میانی است. سری زمانی، تحلیل طیفی و همبستگی‌ها به همراه نمودارهای هافمولر تغییرات غلظت کلروفیل آ به همراه تغییرات جریان نشان داد که جریان‌های شمال-جنوبی نقش مهمی در انتقال کلروفیل آ دارند. تغییرات سیکلی، حدود چهارساله، یک‌ساله یک، شش‌ماهه و سه‌ماهه در غلظت کلروفیل آ، به‌ویژه در خزر میانی مشاهده شد. تغییرات بلندمدت احتمالاً مربوط به پدیده‌های دور پیوند نوسان تغییرات جو-اقیانوس، همانند انسو هستند (احتمالاً با تأخیر زمانی).

واژه‌های کلیدی: شکوفایی جلبکی، بادهای سطحی، دمای سطحی آب، توزیع کلروفیل آ، گردش‌های سطحی، دریای خزر.

## ۱. مقدمه

کم‌کم از بین می‌رود. بررسی علل و عوامل ایجاد زیست‌توده کلروفیلی، شکوفایی جلبک کلروفیلی و حرکت آن در اثر وزش بادهای و جریانات سطحی، به دلیل اثرات زیست‌محیطی، موضوعی مهم در سالم نگه‌داشتن اکوسیستم‌های دریایی است. کلروفیل آ رنگ‌دانه اصلی برای فرایند فتوسنتز در فیتوپلانکتون‌ها است. از عوامل اصلی که بر تولید فیتوپلانکتون اثر می‌گذارد، نور و تغییرپذیری مواد مغذی است. ورود آب شیرین به دریا می‌تواند از طریق ورود مواد مغذی به سیستم، باعث شکوفایی اولیه فیتوپلانکتون‌ها شود. از طرفی افزایش شکوفایی فیتوپلانکتون تنها زمانی امکان‌پذیر است، که

افزایش جمعیت مناطق ساحلی و توسعه سریع صنایع دریایی باعث افزایش فشار بر اکوسیستم‌های ساحلی دریایی به دلیل دریافت آلودگی‌های مختلف ناشی از فعالیت‌های انسانی از طریق تخلیه فاضلاب، پسماندهای صنایع، زهاب مزارع کشاورزی و پرورش آبزیان، نفوذ به آب‌های زیرزمینی و غیره شده است. امروزه، افزایش بیش‌ازحد مواد مغذی در آب‌های ساحلی باعث ایجاد زیست‌توده جلبکی می‌شود که به یک مشکل رو به رشد تبدیل شده است (تنگ و همکاران، ۲۰۱۶).

در دریای خزر در بعضی ماه‌های سال شکوفایی فیتو-پلانکتون به‌وجود می‌آید و گاهی به اوج خود می‌رسد و

استناد: علی اکبری بیدختی، عباسعلی، بهلولی، اصغر و عباسزاده، حامد (۱۴۰۴). بررسی تغییرپذیری میانگین ماهانه کلروفیل آ در دریای خزر در دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۰ مبتنی بر برخی پارامترهای فیزیکی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱ (۲)، ۴۳۱-۴۵۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.391333.1007671>

رایانامه: (۱) [bohluly@ut.ac.ir](mailto:bohluly@ut.ac.ir) | [hamed.aabbaszade@ut.ac.ir](mailto:hamed.aabbaszade@ut.ac.ir)

میزان خالص تجمع زیست توده از نرخ افت آن فراتر رود (هادرینگ، ۱۹۹۴). تجمع رنگ دانه های کلروفیلی عمدتاً ناشی از عواملی مانند فرآیند فراچاهی (Upwelling) است که موجب انتقال مواد مغذی از اعماق به سطح آب که دارای اکسیژن بالا است، می شود و شرایط مناسبی برای تغذیه آبزیان ریز در دریا و دمای مناسب هوای سطحی فراهم می آورد. در مواردی غلظت مواد مغذی به شدت زیاد می شود در عین حال به دلیل مصرف زیاد اکسیژن توسط پلانکتون ها، اکسیژن محلول در آب به شدت کاهش یافته و این موضوع موجب مرگ آبزیان می شود (روحی و همکاران، ۲۰۱۳). آلودگی های بیولوژیکی نظیر ورود گونه های مهاجم نیز می تواند تعادل و پایداری طبیعی اکوسیستم را دچار اختلال کند. امروزه جمعیت گونه های خاصی از فیتو پلانکتون، به خصوص انواع مضر و یا سمی به شدت افزایش یافته، به نحوی که موجب آسیب های مختلف به اکوسیستم های دریایی می شود. افزایش جمعیت آنها در بسیاری از موارد منجر به شکوفایی جلبکی می شود که به اختصار HABs (Harmful Algae Blooms) نامیده می شود (راجان و عبدالسلام، ۲۰۰۶؛ الیمانی و همکاران، ۲۰۰۵). خطرات احتمالی ناشی از پدیده شکوفایی جلبکی در دریا دو نوع هستند، نوع اول مربوط به تولید مواد سمی است که خطراتی برای سلامتی انسان و حیوانات در اثر خوردن غذاهای دریایی سمی ایجاد می کند. نوع دوم نیز اثرات غیرسمی دارند و موجب ایجاد شرایط کمبود اکسیژن محلول در آب و کاهش سازگاری موجودات در منطقه موردنظر می شوند (اندرسون و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰). وقتی حجم بالایی از مواد مغذی، به ویژه فسفر و نیتروژن، به محیط آبی وارد می شود، در دسترس بودن این مواد برای جلبک ها باعث رشد شدید آنها و وقوع پدیده شکوفایی جلبکی (از نوع کشند قرمز) می شود. این پدیده به کمبود شدید اکسیژن در محیط آبی منجر شده و باعث اختلال در عملکرد مطلوب موجودات آبزی می شود. در حالات حاد نیز با تشدید آن، شرایط مرگ موجودات آبزی رخ می دهد (دوراند و همکاران، ۲۰۰۲).

همزمانی ورود مواد مغذی، گرما و عوامل فیزیکی دیگر

همچون باد و جریان در شکوفایی جلبکی نقش مهمی دارد. وقوع شکوفایی جلبکی در مصب ها یا نواحی ساحلی در سال های اخیر افزایش یافته است (باسکای و همکاران، ۱۹۹۷). مکارمی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی شکوفایی جلبک نادولاریا (Nodularia) در حوزه جنوب غربی دریای خزر (محدوده آب های گیلان) سال های ۸۵-۱۳۸۴ نشان دادند که در شهریور ۱۳۸۴ (سپتامبر ۲۰۰۵) یک شکوفایی غیرعادی در محدوده آب های ساحلی جنوب غربی دریای خزر رخ داده است. پژوهشکده آبی پروری، پس از نمونه برداری بر اساس مشخصات مورفولوژیکی (ریخت شناسی)، عامل این شکوفایی غیرعادی را جنس نادولاریا از شاخه سیانوفیتا شناسایی کرد. این شکوفایی فیتوپلانکتونی بسیار سریع اتفاق افتاد و ۲۰۰۰۰ کیلومترمربع از دریای خزر را در بر گرفت. تصاویر ماهواره ای شروع این پدیده را ۲۱ مرداد (۱۲ اوت) و خاتمه آن را ۱۰ شهریور (۱ سپتامبر) ثبت کرده است. تحلیل تصاویر ماهواره ای وقوع چنین پدیده ای را با این حجم طی پنج سال گذشته در دریای خزر نشان نمی دهد. ضخامت لایه شناور جلبکی بیش از ده ها سانتی متر بوده و زیست توده آن بسیار زیاد بوده است، به طوری که خطر آلودگی شدید نواحی ساحلی ایران با محصولات پوسیده جلبکی را تهدید می کرد. خوشبختانه تغییرات جوی از پخش محصولات این شکوفایی به نواحی ساحلی ایران ممانعت کرده و باعث انهدام و نابودی آن شد. مهم ترین عامل در ایجاد این شکوفایی جلبکی دمای سطحی بالای ۳۰ درجه سلسیوس و عدم وزش باد بوده است. بررسی های مدبری و همکاران (۲۰۲۰) که برای سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ روی توزیع افقی کلروفیل آ در دریای خزر انجام شده نشان می دهد، غلظت این پارامتر در بخش هایی از شمال و شمال غربی دریا خزر (ورودی رودخانه ولگا) که مقدار زیادی منابع نیترات و فسفات به خزر وارد می شود، بیشتر است. این باعث شکوفایی جلبک دریایی (فیتوپلانکتون ها) شده و بنابراین غلظت توده زیستی و کلروفیل آ به طور فزاینده ای افزایش می یابد. این شرایط منجر به پدیده تغذیه گرایی (Eutrophication) (TSI~80) می شود که معرف شرایط

دریایی) در مناطق ساحلی حوضه جنوبی دریای خزر تا محدوده عمقی ۳۰ متر در دوره مورد بررسی و مقایسه آن با سال‌های پیشین بوده است.

باباگلی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های میدانی (البته در منطقه محدودی در خزر جنوبی) به بررسی تغییرات جریان‌ها و احتمال نقش امواج کلوین ساحلی بر آنها پرداخته‌اند. هوزه و همکاران (۲۰۱۷) نیز برای تعیین الگوهای جریان در دریای مدیترانه از روش سنجش از دور استفاده کرده و آنها را با اندازه‌گیری‌های میدانی درستی‌سنجی کردند. استفاده از داده‌های سنجش از دور به دلیل یکپارچه و وسیع بودن، تنوع طیفی، تهیه پوشش‌های تکراری آن، در مقایسه با سایر روش‌های گردآوری داده‌ها از قابلیت‌های ویژه‌ای برخوردار است (قانع و همکاران، ۲۰۱۶). این محققان الگوهای جریان شامل جریان‌های جتی و چرخشی (پیچک‌های میان‌مقیاس) را به دست آورده‌اند. ابرایوف و همکاران (۲۰۱۰) نیز به تغییرپذیری گردش‌های بزرگ‌مقیاس در دریای خزر طی فصول مختلف با روش شبیه‌سازی عددی پرداخته‌اند.

امکان سنجش‌ازدور، سهل‌الوصول بودن داده‌ها، دسترسی سریع به نقاط دورافتاده و دقت بالای آنها، از امتیازات خاص این فن محسوب می‌شود (احسانی، ۱۳۹۱، سرنگی، ۲۰۱۲، سرنگی و همکاران، ۲۰۰۸، احمدی و همکاران، ۲۰۲۰). درستی‌سنجی این نوع داده‌ها نیز با اندازه‌گیری‌های میدانی انجام‌شده است، مثلاً مظفری و همکاران (۲۰۲۳) نیز نمونه این داده‌ها که از ماهواره اکوا-مودیس (Aqua-MODIS) به دست آمده را با حدود ۸۰ درصد (با ۲۰ درصد خطا) با اندازه‌گیری میدانی درستی‌سنجی کرده‌اند.

کاستیانو و همکاران (۲۰۱۹) با کمک تصاویر ماهواره‌ای به بررسی تغییرات فصلی کلروفیل آ دریای خزر در نتیجه شکوفایی جلبکی طی سال‌های اخیر پرداختند. آنها مشخص کردند که این پدیده در قسمت‌های شمال-غربی و جنوب شرقی دریای خزر ایجاد می‌شود و دلایل ایجاد آنها متفاوت است، به‌طوری‌که حرکات فراچاهی با بالا آوردن آب‌های مغذی در شکوفایی جلبک‌های دریایی در آب‌های

کیفی بسیار نامناسب برای آب دریاست. برای نشان‌دادن شرایط کیفی و پتانسیل ایجاد شکوفایی جلبکی معمولاً از شاخص TSI (Trophic State Index) استفاده می‌شود. تحقیقات موجود نشان می‌دهد تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های (بدون نظارت مناسب) همانند ورودی پساب‌های صنعتی و خانگی به این حوزه دریایی، شرایط افزایش هرچه بیشتر توده زیستی جلبک‌های دریایی در این محیط دریایی را ایجاد کرده است. لازم به ذکر است که تقریباً ۳۰۰ گونه فیتوپلانکتون، که ۷ درصد از انواع گونه‌های فیتوپلانکتون‌های شناخته‌شده هستند، شامل دیاتومه‌ها، دینوفلاژله‌ها، سیلیکوفلاژله‌ها، پریمنیوفیت‌ها و رافیدوفیت‌ها، به عنوان عامل شکل‌گیری کشند قرمز (شکوفایی جلبکی مخرب) گزارش شده‌اند (اسماید، ۱۹۹۷). سوندا و همکاران (۲۰۰۶) به نقش مخرب جلبک‌های دریایی و اثر بازخورد مثبت آنها که باعث بدتر شدن شرایط رشد برای فیتوپلانکتون‌های مفید اقیانوس‌ها می‌شوند، پرداخته‌اند.

لاوارووا و همکاران (۲۰۲۴) نیز به تغییرات کلروفیل، به‌ویژه روندهای زمانی غلظت کلروفیل در حوزه‌های شمالی، میانی و جنوبی خزر پرداختند و نشان دادند که این روند زمانی در ده سال گذشته برای حوزه شمالی، که رود ولگا به آن تخلیه می‌شود، مثبت ولی برای حوزه‌های میانی و جنوبی اندکی منفی بوده است. در بعضی گونه‌های شکوفایی سمی، رشد دیگرگونه‌های فیتوپلانکتون‌ها محدود می‌شود و بنابراین گونه‌های مضر به‌طور کامل بر فیتوپلانکتون غالب می‌شود (حمزه‌ئی و همکاران، ۱۳۹۰). مخلوق و همکاران (۱۴۰۰) با تعیین پتانسیل شکوفایی جلبکی و کیفیت آب بر اساس غلظت کلروفیل آ، تراکم وزنی توده فیتوپلانکتون در مناطق ساحلی حوزه جنوبی دریای خزر (۹۸-۱۳۹۷) نتیجه گرفتند که دریای خزر در دو دهه اخیر با وقایع بوم‌شناختی مختلف از قبیل شکوفایی مضر جلبکی و افزایش سطح تروفیک مواجهه بوده است. با توجه به بهره‌وری دریای خزر در راستای شیلاتی، انجام مطالعات پایش در این بدنه آبی ضروری هست. در این تحقیق، بررسی شکوفایی جلبکی، سطح تروفیک (زیست‌بوم

فراساحلی نقش دارد و بیشتر در بخش شرقی خزر در اثر بادهای فصلی شمال شرقی ایجاد می‌شود.

البته امروزه از مدل‌های عددی نیز برای بررسی تغییرات غلظت شکوفایی جلبکی استفاده می‌شود. مثلاً ثمنی و همکاران (۱۴۰۰) با شبیه‌سازی عددی، با استفاده از مدل جفت شده ROMS-NPZD تغییرات فصلی پلانکتون‌ها و مواد مغذی در شمال دریای عمان را مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی با استفاده از شرایط اولیه از داده‌های WOA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه و گام زمانی ۳۰۰ ثانیه به مدت یک سال انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر دما از عوامل اصلی در فراوانی میزان فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها است و پیچک‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد که بیانگر به‌ترتیب پدیده فرو و فراچاهی در دریای عمان و تنگه هرمز هستند، باعث انتقال کلروفیل از مناطق جنوبی به مناطق شمالی می‌شوند. همین‌طور مقدار کلروفیل در طول زمستان در مقایسه با تابستان بیشتر است، که علت آن می‌تواند تغییرات ترموکلاین فصلی باشد. علی‌رغم در دسترس بودن بالقوه مواد مغذی، کم‌عمق شدن لایه ترموکلاین مانع شکوفایی می‌شود. نتایج این پژوهش در یک دوره یک‌ساله نشان داد فیتوپلانکتون‌ها بیشترین مقدار را اواخر اسفند و اوایل بهار نشان می‌دهند. فروردین‌ماه به‌علت افزایش جمعیت فیتوپلانکتون‌ها، اوج شکوفایی زئوپلانکتون‌ها است. همچنین تمرکز پلانکتون‌ها بیشتر به مواد مغذی وابسته است به‌طوری‌که در دسترس بودن مواد مغذی اغلب عاملی کلیدی در رشد آنها است و مقدار کلروفیل در زمستان همبستگی مثبتی را با دمای سطح آب نشان می‌دهد، درحالی‌که در تابستان، این همبستگی منفی است، البته غلظت کلروفیل در زمستان و تابستان اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد. صدیق مروستی و همکاران (۲۰۱۶) نیز به شکوفایی جلبک‌های دریایی در دریای عمان و دریای عرب پرداختند و نشان دادند که شکوفایی در دو و یا سه نوبت در سال (به‌خصوص پاییز و زمستان) در این منطقه رخ می‌دهد. آنها به این پی بردند، که پیچک‌های میان‌مقیاس چرخندی که همراه با حرکات فراهنج است، نیز با توجه به

دمای سطحی مناسب، می‌توانند شرایط شکوفایی جلبک و افزایش کلروفیل را در این منطقه فراهم کنند. رهنمایا و همکاران (۲۰۲۲) نیز به بررسی عددی پیچک‌های میان-مقاس دریای خزر پرداختند و نشان دادند که توپوگرافی نقش مهمی در ایجاد این پیچک‌ها دارد. صحت کاشانی و همکاران (۲۰۲۲) نیز به تغییرپذیری کلروفیل در سواحل جنوبی ایران در فصل سرد پرداختند و نشان دادند که به نظر می‌رسد تاخیر زمانی در همبستگی دمای سطح آب، و غلظت کلروفیل آب و عمق نوری جو وجود دارد که نشانگر نقش مهم تابش خورشیدی ورودی در تغییر این پارامترها است.

دریای خزر بزرگ‌ترین دریای محصور در خشکی است که تأثیرات زیادی بر آب‌وهوای مناطق ساحلی و کشورهای اطراف خود دارد، به‌طوری‌که هرگونه تغییرات در اقلیم آب‌وهوایی آن به‌طور مستقیم بر اقتصاد، آب‌وهوا و زندگی مردم در سواحل آن اثر دارد. به‌همین دلیل پرداختن به تغییرات اقلیمی دریای خزر از جمله دمای سطح آب، بادهای سطحی و جهت آنها، که می‌تواند در تغییر کلروفیل، و اثرات آن بر آبزیان مؤثر باشد، اهمیت دارد.

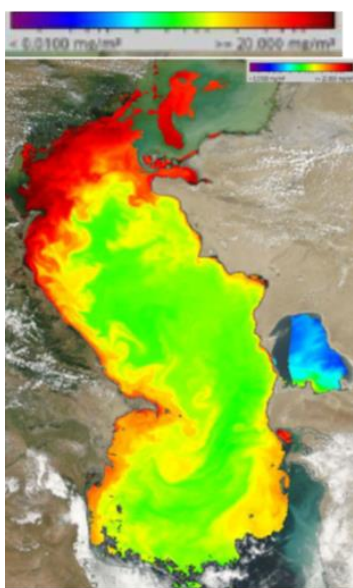
هدف پژوهش حاضر بررسی ماهانه غلظت کلروفیل آ از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ به‌همراه نقشه‌های میدان‌های دمای سطحی، باد، جریان و ارتفاع‌سنجی در دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (مودیس-اکوا)، که بارها توسط اندازه‌گیری‌های میدانی درستی‌سنجی شده (مظفری و همکاران، ۲۰۲۳)، به‌ویژه برای ماه‌هایی را که دارای بیشترین شکوفایی جلبکی که حاصل آن افزایش کلروفیل آ است، می‌باشد. با استفاده از نقشه‌ها، نمودارهای زمانی، طیف تغییرات و نمودارهای هافمولر تغییرات فصلی، سالانه و درازمدت غلظت کلروفیل به‌همراه جریان‌های سطحی در دریای خزر بررسی شد.

## ۲. منطقه مورد بررسی، داده‌ها و شیوه پژوهش

منطقه مورد بررسی دریای خزر است که امروزه در معرض تخریب روزافزون انسانی از ناحیه همسایگان آن قرار گرفته

گرفته شده و تغییرات کلروفیل به همراه تغییرات دمایی بررسی شده است، ۲- داده‌های کمی در مورد غلظت کلروفیل و دمای سطحی آب نیز از سایت مای‌ناسا (<https://mynasadata.larc.nasa.gov>) دریافت شده است که عمدتاً از طریق سنجنده مودیس و با یکای غلظت میلی گرم بر متر مکعب برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ با تفکیک ۱۰ کیلومتر ماهانه اندازه‌گیری می‌شود (نقشه‌ها با نرم‌افزار Ferret رسم شده‌اند)، ۳- داده‌های میانگین هفتگی جریان سطحی، ارتفاع‌سنجی و دمای سطحی با تفکیک ۳۰ کیلومتر از نیز از سایت آویزو (<https://las.aviso.altimetry.fr>) دریافت شد.

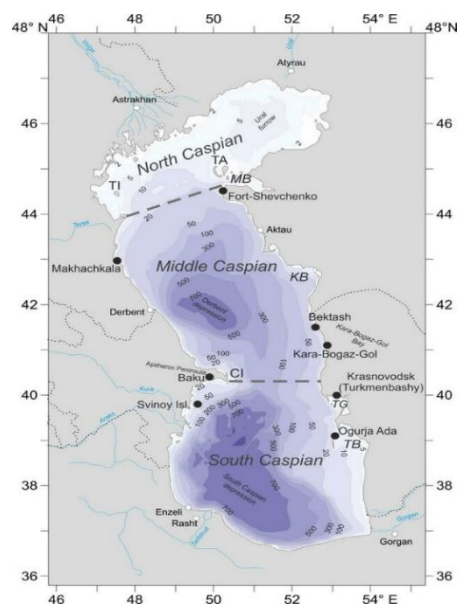
شکل ۱-الف نقشه حوزه دریای خزر را با اطلاعات توپوگرافی نشان می‌دهد. همین‌طور شکل ۱-ب تصویر ماهواره اکوا مودیس از غلظت زیاد کلروفیل بخش شمالی و سواحل غربی دریای خزر (در امتداد جریان شمالی) برای ۲۶ ژوئیه ۲۰۲۲، و بخش کوچکی از ساحل جنوب شرقی می‌باشد. جبهه کلروفیل دارای ساختار پیچکی (میان و زیر میان‌مقیاس) است که نشانه اختلاط افقی آب‌های کلروفیلی با آب‌های اطراف آن است ("جبهه" کلروفیل قسمت شمالی-میانی دریای خزر شکل ۱-ب).



(ب)

است. بخش عمده مواد آلی که می‌تواند تغذیه فیتوپلانکتون‌ها باشد از رودخانه بزرگ ولگا به این حوزه حساس دریایی وارد می‌شود، که با افزایش گرمای جهانی پدیده شکوفایی جلبکی را در بخش‌ها شمالی و میانی افزایش داده است. دریای خزر به سه حوزه، شمالی (با عمق میانگین ۶ متر)، حوزه میانی (با عمق میانگین ۱۷۵ متر) و حوزه جنوبی (با عمق میانگین ۳۰۰ متر) تقسیم می‌شود. بر اساس نتایج بخش بعدی مشخص خواهد شد که کلروفیل حاصل از شکوفایی در حوزه شمالی با جریان‌های شمال جنوبی که نسبتاً (به دلیل شمال-جنوبی بودن دریای خزر) قوی‌تراند، به حوزه میانی هم سرایت می‌کند. در بخش بعد نمونه‌ای که ابتدا افزایش غلظت جلبکی در حوزه میانی شروع و اثر جریان‌های شمالی به حوزه جنوبی دریای خزر سرایت کرده است، ارائه خواهد شد.

در پژوهش حاضر از سه دسته داده استفاده شد؛ شامل، ۱- داده‌های ماهانه ماهواره‌ای سایت ناسا شامل غلظت کلروفیل و داده‌های دمایی سطح دریای خزر (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)، که نقشه‌های غلظت کلروفیل ۱۲ ماه از سال به همراه تصاویر ماهواره‌ای (Aqua/MODIS) دما در ۱۲ ماه سال از سایت مربوط



(الف)

شکل ۱. (الف) نقشه حوزه دریای خزر به همراه توپوگرافی و حوزه‌های شمالی، میانی و جنوبی، (ب) تصویر ماهواره اکوا مودیس از غلظت زیاد کلروفیل بخش شمالی و سواحل غربی دریای خزر (در امتداد جریان شمالی) برای ۲۶ ژوئیه ۲۰۲۲. دامنه غلظت کلروفیل از ۰/۱ تا ۲۰ میلی گرم بر متر مکعب است.

(تنش نسبتاً شدید باد) و نوار سطح آب به طول ۱۰۰ کیلومتر در امتداد ساحل و پهنای ۳۰ کیلومتر، شار حجمی آب فراچاهی حدود ۳ سوردراپ خواهد بود.

در ادامه به بررسی همبستگی‌های بین تغییرات کلروفیل و سایر پارامترها پرداخته خواهد شد. در این راستا تغییرپذیری پارامترها به کمک تحلیل طیفی سری‌های زمانی نیز ارائه می‌شود. سپس نقشه‌های هافمولر کمیت‌ها، به‌ویژه غلظت کلروفیل و جریان‌ها نیز ارائه می‌شود. نمودارهای طیف تغییرات به کمک نرم‌افزار (DADISP and Data Aalysis and Display Software)، با تحلیل فوریه سری‌های زمانی کمیت‌ها فیزیکی مورد بررسی انجام شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. تغییرات زمانی، طیفی و همبستگی‌ها در دوره مطالعه

برای تعیین زمان‌هایی که شکوفایی عمده در دریای خزر وجود داشته ابتدا سری زمانی غلظت کلروفیل آ در قسمت مرکزی دو حوزه میانی و جنوبی بررسی شد. شکل ۲-الف سری زمانی این تغییرات را به همراه تغییرات دمای سطحی (و همین‌طور سیگنال نینو اقیانوس، ضمیمه ۱، به‌منظور اثرپذیری آن ناشی از پدیده دور پیوند انسو) نشان می‌دهد. تغییرات دمای سطحی به ظاهر همبستگی خوبی را با غلظت کلروفیل نشان می‌دهد، بدین معنی که هر ساله در اوایل بهار و در تابستان شکوفایی‌های عمده در هردو حوزه مشاهده می‌شود (در این زمان‌ها معمولاً فراوانی گردوغبار از بیابان قره‌قوم نیز به حوزه دریای خزر سرایت می‌کند (مثلاً بنکس و همکاران، ۲۰۲۲) و می‌تواند یکی از عوامل شکوفایی‌های عمده جلبکی دریای خزر باشند و نیاز به بررسی مجزا دارد). روند تغییرات با زمان بسیار اندک، حتی کاهشی است که با بررسی‌های لاواروا و همکاران (۲۰۲۴) همخوان است. برخی پدیده‌های شکوفایی، مثل اوایل سال ۲۰۱۲، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و یا ۲۰۱۸ با غلظت زیاد کلروفیل همراه هستند. هنگامی که پدیده شکوفایی جلبکی در دریای خزر شدید است، با توجه به گسترش قابل ملاحظه آن، افزایش غلظت کلروفیل در هردو حوزه مشاهده می‌شوند. در شکل ۳

ابتدا داده‌های سری‌های زمانی از تغییرات کلروفیل و سایر پارامترهای فیزیکی آب‌وهوا که در تولید و گسترش آن مؤثرند ارائه خواهد شد. سپس نمونه‌هایی از الگوهای شروع، اوج و مراحل پخش این پدیده به‌همراه نقشه‌های توزیع سایر پارامترهایی فیزیکی در دریای خزر ارائه می‌شود. به‌همراه آن نمونه‌هایی از تصاویر رنگ اقیانوس که از سنجنده مودیس به‌دست آمده، برای مقایسه میدان‌های توزیع کلروفیل ارائه می‌شود.

لازم به‌ذکر است که از داده‌های ارتفاع‌سنجی، با استفاده از توازن زمینگرد،  $U = -(1/(\rho f)) \partial h / \partial y$ ,  $V = (1/(\rho f)) \partial h / \partial x$  که  $U$  و  $V$  به‌ترتیب مؤلفه‌های شمال‌سو و شرق‌سوی جریان،  $\rho$  چگالی آب،  $f$  پارامتر کوریولیس (با مقدار نوعی حدود  $0.001$  بر ثانیه در عرض‌های حوزه میانی خزر) و  $h$  ارتفاع سطح آب می‌باشد که از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای (انحراف از سطح بی‌حرکت دریا، معروف به ژئوئید) به‌دست می‌آید، می‌توان مؤلفه‌های جریان سطحی را به‌دست آورد.

انتقال اکمن توسط تنش باد،  $\tau_w = \rho_{air} C_d V^2$  که  $V$  سرعت باد ده متری،  $\rho_{air}$  چگالی هوا و  $C_d$  ضریب کشال که حدود  $10^{-3} \times (1-2)$  است، که عبارت است از  $M \approx \tau_w / (\rho f)$  (که  $\rho$  چگالی آب و  $f$  پارامتر کوریولیس است)،  $M$  دارای یکای  $m^2/s$  است که بر واحد عرض عمود بر جهت انتقال اکمن است (گیل، ۱۹۸۲).

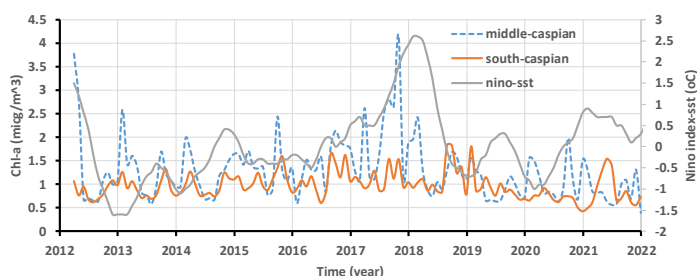
همین‌طور مؤلفه قائم جریان، ناشی از پمپاژ اکمن عبارت است از  $W_E = \{ [1/(\rho f)] [(\partial \tau^{(y)} / \partial x - \partial \tau^{(x)} / \partial y) + [\beta \tau^{(x)}] / (\rho f^2)] \}$  که  $\tau^{(x)}$  و  $\tau^{(y)}$  مؤلفه‌های شرق‌سو و شمال‌سو تنش باد و جمله اول و دوم به‌ترتیب ناشی از تاو تنش باد و از مؤلفه مداری تنش باد با اثر بتا ( $\beta \sim 10^{-11} (sm)^{-1}$ ) است. جمله دوم معمولاً برای منطقه فرا استوایی کوچک است. برای ساحل شرقی خزر (با باد شمالی)، فقط با شیو مداری مؤلفه نصف-النهاری تنش باد (منفی و کاهشی نسبت به  $x$ ) این تقریباً  $W_E = \{ [1/(\rho f)] (\partial \tau^{(y)} / \partial x) \}$  است و برای مقادیر نوعی تنش سطحی باد شمالی (دامنه بادهای شکل ۷-ت) پارامتر کوریولیس در عرض حوزه میانی خزر، حدود  $0.001$  تا  $0.001$  متر بر ثانیه خواهد بود. با حدود ۱ میلی‌متر بر ثانیه

بیشتر از مقادیر قله‌های طیف خزر جنوبی (که حدود ۲۰ درصد مقادیر مشابه آن در حوزه میانی است) می‌باشد و همین‌طور قله شش ماهه طیف خزر میانی خیلی بزرگ‌تر از قله مشابه برای خزر جنوبی است و نشان می‌دهد که تغییرات فصلی کلروفیل در خزر میانی خیلی برجسته‌تر است که در نمودار هافمولر (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) نیز بارز است.

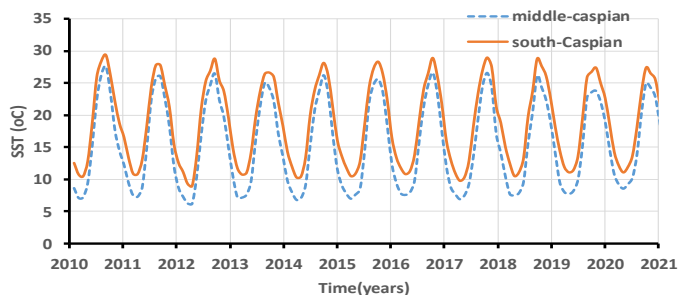
لازم به ذکر است که برخی سال‌ها در ماه‌های زمستان نیز شاهد شکوفایی جلبکی هستیم، مثلاً سال‌های ۲۰۱۳ و یا ۲۰۱۹ (شکل ۲-الف) که دمای سطحی دریای خزر، به‌ویژه حوزه جنوبی دارای بی‌هنجاری دمایی تابستانه هستند (شکل ۲-ب).

همبستگی تغییرات میانگین ماهانه غلظت کلروفیل در دو حوزه جنوبی و میانی آمده است که نشان می‌دهد غلظت میانگین ماهانه آن در حوزه جنوبی حدود ۲۰ درصد مقدار میانگین حوزه میانی آن (با ضریب همبستگی حدود ۴۰ درصد) است. این همبستگی برای غلظت‌های بیشتر (پدیده‌های فراگیرتر) نیز بالاتر است.

نمودارهای طیف تغییرات کلروفیل و همبستگی اندازه قله‌های طیف‌ها، نیز برای دو حوزه در شکل ۴-الف آمده است و نشان می‌دهد که تغییرات چندساله، سالانه، شش ماهه و سه ماهه، که تغییرات سالانه دارای شدتی بیشتر است. البته اندازه قله‌های تغییرات در طیف‌ها در خزر میانی خیلی

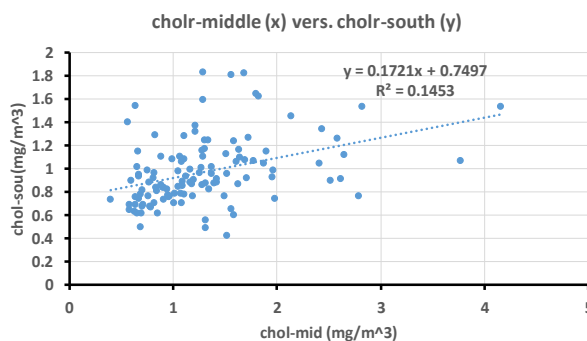


(الف)



(ب)

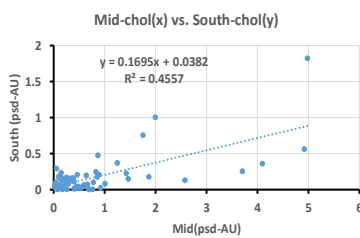
شکل ۲. تغییرات میانگین‌های ماهانه کلروفیل (الف)، به میلی گرم بر متر مکعب، و دمای سطحی، oC (ب) در حوزه جنوبی (۳۸ شمالی و ۵۱ درجه شرقی) و حوزه میانی خزر (۴۲ شمالی و ۵۱ درجه شرقی) برای ۲۰۱۰-۲۰۲۱. در شکل (الف) سیگنال نینو-اقیانوس (بی‌هنجاری دمایی اقیانوس کبیر استوایی) با حدود دو سال تفاوت زمانی پیشرو (شروع از ۲۰۱۰، نیز آورده شده است، ضمیمه ۱).



شکل ۳. همبستگی تغییرات غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه‌های میانی (محور افقی) با مقادیر آن در خزر جنوبی (محور قائم) دریای خزر.

طیف تغییرات کلروفیل، ۴-الف) ولی تغییرات مؤلفه شرق-سو در خزر جنوبی، و تا حدی حوزه میانی دارای تغییرات چندساله بیشتری است. با توجه به این که این حوزه آبی گسترش شمال جنوبی بیشتری است انتظار می رود که تغییرات طیفی جریان‌ها شمال-جنوبی در حوزه میانی بیشتر محسوس باشد.

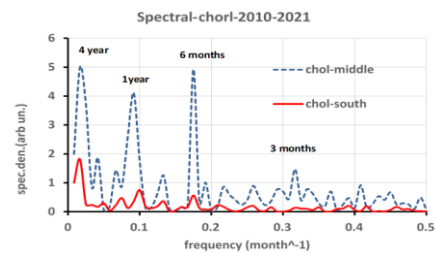
تغییرات طیفی فصلی برای مؤلفه شمال-جنوبی (شکل ۵-ب) با تغییرات طیفی کلروفیل (شکل ۴-الف) همخوان است که نشان می دهد نقش جریان‌های شمال-جنوبی در رخداد پدیده شکوفایی جلبکی و انتقال آن (به ویژه به سوی جنوب) بارزتر است. هنگام بررسی در میدان‌های مؤلفه شمال‌سوی جریان به هنگام رخداد پدیده‌ها، در بخش بعدی، حرکات شمال‌سو و جنوب‌سوی تقریباً سراسری مشاهده می‌شد (در شکل ۷-ز). مؤلفه مداری جریان کوچک‌تر از مؤلفه نصف‌النهاری است و دارای تغییرات فصلی کمتری است.



(ب)

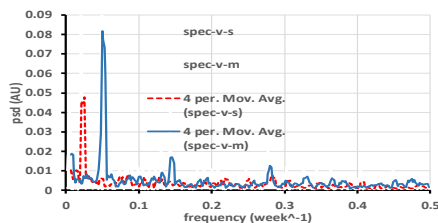
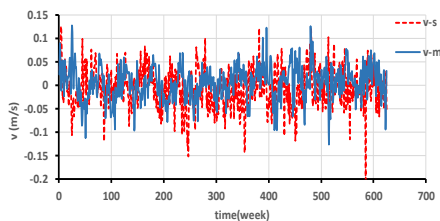
شکل ۴-ب نیز نشان می‌دهد که مقادیر قله‌های طیف‌های دو حوزه دارای همبستگی (نسبت مقدار غلظت کلروفیل حوزه جنوبی حدود ۱۷ درصد مقدار آن در حوزه میانی، شیب برازش شکل ۴-ب) با ضریب همبستگی حدود ۶۷ درصد است که نشانگر رخداد پدیده‌های عمده فصلی و سالانه و حتی چند ساله است که هر دو حوزه را متأثر می‌کند. این ممکن است به تغییر پذیری پدیده‌های جو-اقیانوس بزرگ‌مقیاس همچون انسو مربوط باشند (ضمیمه ۱).

به‌منظور تأثیرپذیری تغییرات کلروفیل از گردش و جریان‌های سطحی در بخش‌های مرکزی حوزه میانی و جنوبی، سری‌های زمانی و طیف تغییرات مؤلفه‌های سرعت جریان سطحی برای دوره زمانی مورد مطالعه نیز در شکل ۵ آمده است. این طیف‌ها نشان می‌دهد که تغییرات مؤلفه شمال‌سو در حوزه میانی قله‌های هماهنگ‌های سالانه، فصلی برجسته‌ای دارند (همچون

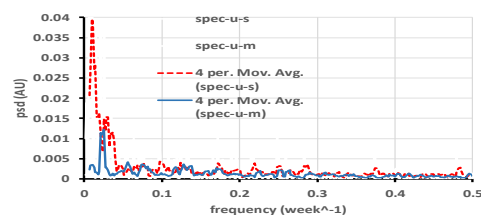
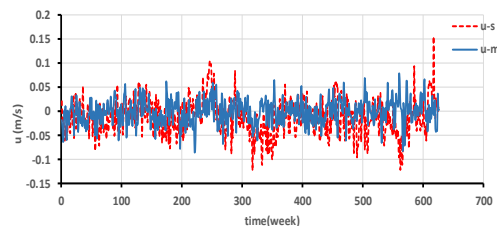


(الف)

شکل ۴. طیف تغییرات کلروفیل در حوزه میانی و در حوزه جنوبی خزر (الف) و همبستگی تغییرات مقادیر قله‌های طیف‌های این دو حوزه بر علیه هم (ب). AU. و (Arbitrary unit) arb un. در مقادیر نسبی طیف (Power spectra density) psd واحد اختیاری هستند.



(ب)

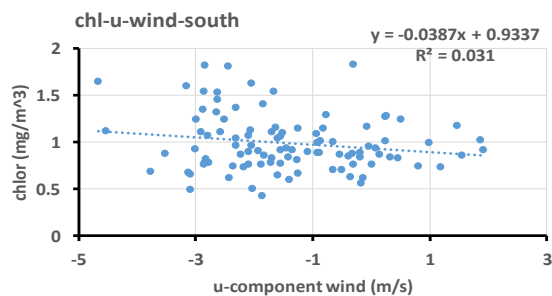


(الف)

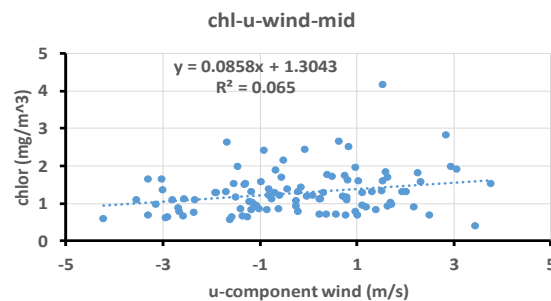
شکل ۵. سری‌های زمانی و طیف تغییرات مؤلفه‌های جریان‌های سطحی، مؤلفه مداری جریان (الف، u) و مؤلفه نصف‌النهاری (ب، v) برای دو حوزه ی میانی (m) و جنوبی (s).

معنادارترند پرداخته می‌شود. شکل ۶ نمونه‌هایی از آنها برای دوره ۱۲ ساله برای داده‌های ماهانه را نشان می‌دهد.

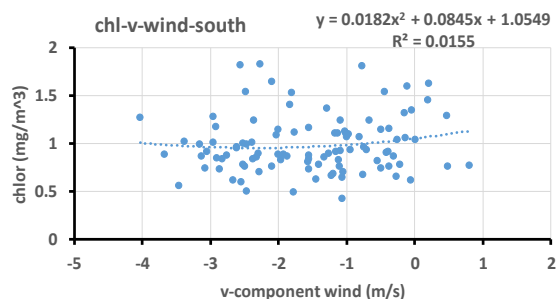
همبستگی‌های غلظت کلروفیل با پارامترهای فیزیکی همچون مؤلفه‌های باد و جریان بررسی شد و در اینجا به این همبستگی‌ها که تا حدی



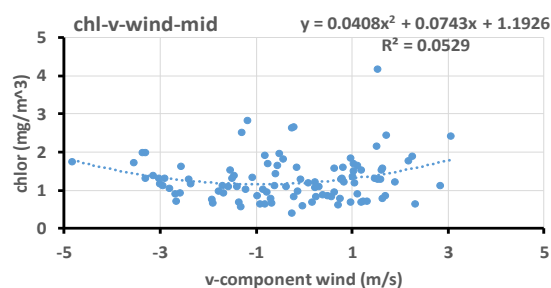
(ب)



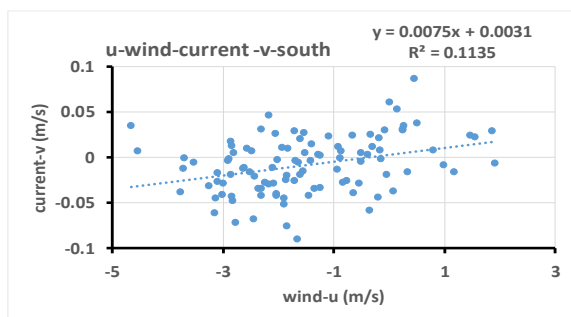
(الف)



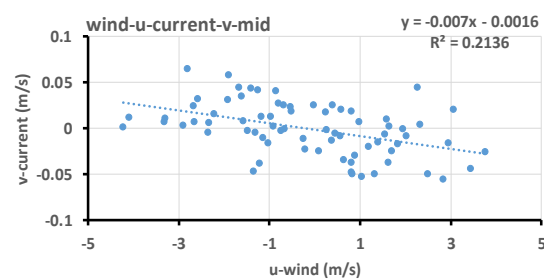
(د)



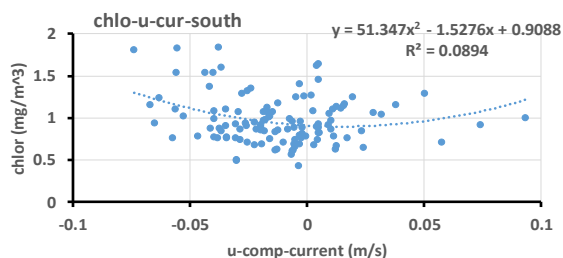
(ج)



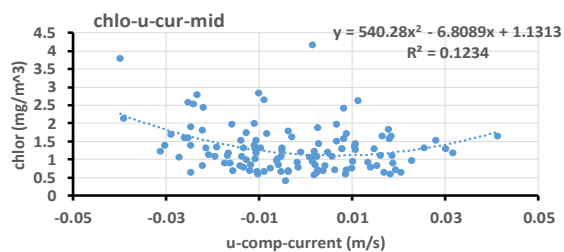
(ی)



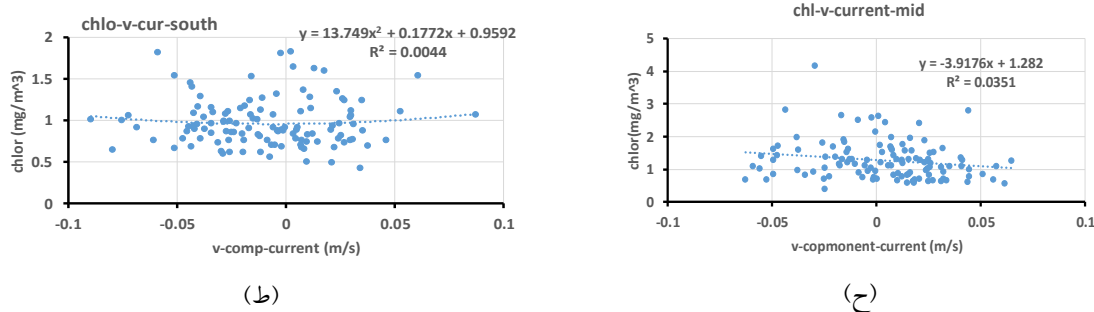
(ه)



(ز)



(و)



شکل ۶. همبستگی تغییرات ماهانه غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه‌های میانی با مؤلفه باد غربی-شرقی (الف)، و همین‌طور برای حوزه جنوبی (ب)، تغییرات غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه میانی با مؤلفه باد جنوب-شمالی (ج)، و همین‌طور برای حوزه جنوبی (د)، تغییرات مؤلفه غربی باد با مؤلفه جنوبی جریان در دریای خزر میانی (ه)، مقادیر آن در خزر جنوبی (ی)، که نشان می‌دهد مؤلفه شمال جنوبی جریان با باد شرقی-غربی، به دلیل انتقال اکمن همبستگی دارد (تنش باد غربی-شرقی بر اساس نظریه اکمن انتقال اکمن به ترتیب جنوب-شمال سو را ایجاد می‌کند، به‌ویژه برای حوزه میانی، البته اثرات شناوری نیز علاوه بر باد در این جریان‌ها نقش دارند). تغییرات ماهانه غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه میانی با مؤلفه جریان شرق سو (و)، و همین‌طور برای حوزه جنوبی (ز)، تغییرات غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه میانی با مؤلفه جریان شمال سو (ح)، و همین‌طور برای حوزه جنوبی (ط).

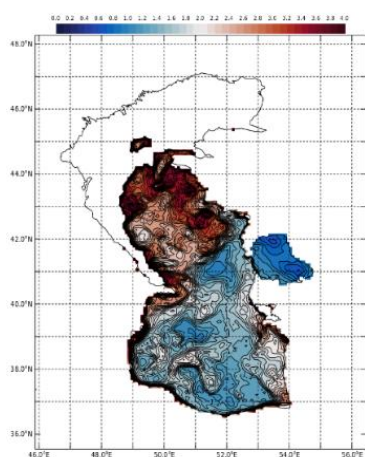
(۲۰۱۹).

شکل ۶ نیز همبستگی تغییرات ماهانه غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه میانی با مؤلفه جریان شرق سو (و)، و همین‌طور برای حوزه جنوبی (ز) و تغییرات غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه میانی با مؤلفه جریان شمال سو (ح)، و همین‌طور برای حوزه جنوبی (ط) را نشان می‌دهند. در اینجا مشخص است که تنها تغییر غلظت کلروفیل با جریان شرقی-غربی دارای اندکی همبستگی است (و، ز).

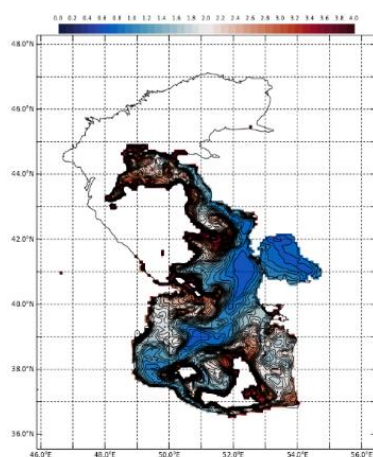
### ۳-۲. نمونه توزیع مکانی تغییرات کلروفیل

حال به بررسی تغییرات کلروفیل در ماه‌هایی که فعالیت شکوفایی بیشتر بوده به همراه توزیع دمای سطحی، میدان باد ده متری سطحی، به همراه میدان مؤلفه شمال-جنوبی جریان سطحی در دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ پرداخته می‌شود. برای سال ۲۰۱۷ (شکل ۷-الف، به‌ویژه برای حوزه میانی و به نیمه دوم آن، (شکل ۷-الف) ژوئیه (الف)-شروع)، ماه اوت (ب-اوج) و سپتامبر (ج) شکوفاترین ماه‌های از نظر کلروفیل بود (بخش‌های سفید شکل فاقد داده است). برای این پدیده ماه اوت و سپتامبر شکوفاترین ماه‌های از نظر کلروفیل بوده که در دو حوزه میانی و تا حدی جنوبی گسترش داشت.

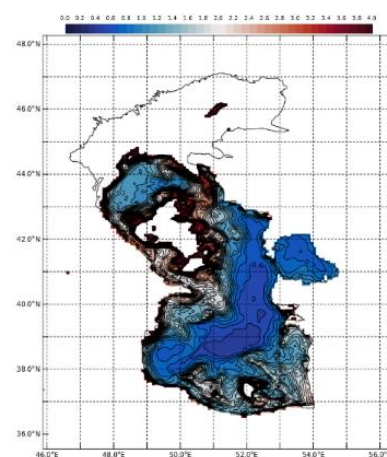
غلظت کلروفیل برای حوزه میانی، وقتی مؤلفه مداری باد شرقی است (شکل ۶-ب) که با توجه انتقال اکمن که جریان سطحی شمال سو را ترغیب می‌کند (شکل ۶-ه)، اندکی کاهشی است، ولی برای باد غربی که جریان جنوب سو را ایجاد می‌کند، افزایشی است (شکل ۶-الف). این نشان می‌دهد که منشاء شکوفایی جلبکی عمدتاً در بخش شمالی دریای خزر است. برای حوزه جنوبی این بر-عکس است، البته با معنی داری کمتر (شکل‌های ۶-ب، ج، ی). تغییرات غلظت کلروفیل بخش‌های مرکزی حوزه میانی با مؤلفه باد جنوب-شمالی (شکل ۶-ج)، و تاحدی برای حوزه جنوبی (شکل ۶-د)، به نظر می‌رسد رابطه درجه دو، حول مقادیر اندک این مؤلفه باد دارد. همبستگی مؤلفه جریان شمال-جنوبی (که نقش مهمی در انتقال در دریای خزر دارند) با باد غربی-شرقی (که غالب هستند) در دو حوزه خزر میانی و جنوبی متفاوت عمل می‌کنند (شکل‌های ۶-ه، ی)، به طوری که باد شرقی در حوزه میانی جریان شمال سو (همخوان با انتقال اکمن) ولی در خزر جنوبی جریان جنوب سو (با معنی داری کمتر) را به وجود می‌آورد، که احتمالاً در نتیجه شکل و توپوگرافی بستر (همراه با تغییرات عمق آب) حوزه جنوبی است. (البته علاوه بر باد اثرات شناوری نیز در ایجاد جریان‌ها نقش مهمی در دریای خزر دارند، مثلاً بایگلی و همکاران،



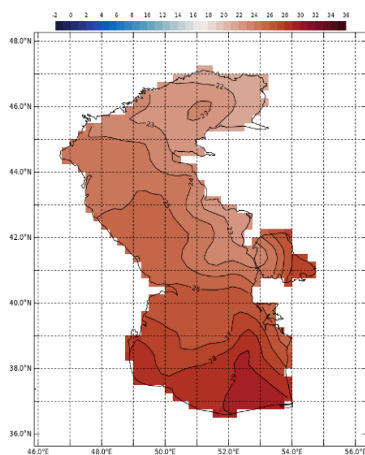
ج) سپتامبر ۲۰۱۷



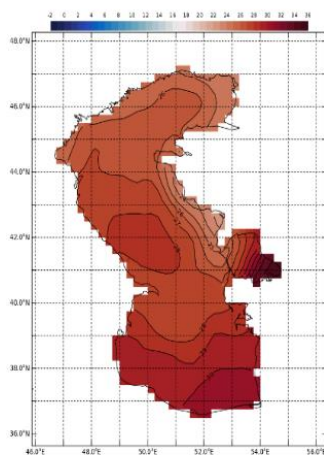
ب) اوت ۲۰۱۷



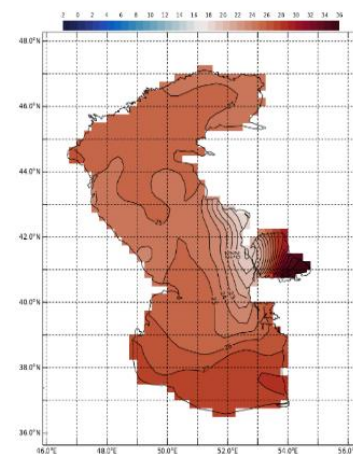
الف) ژوئیه ۲۰۱۷



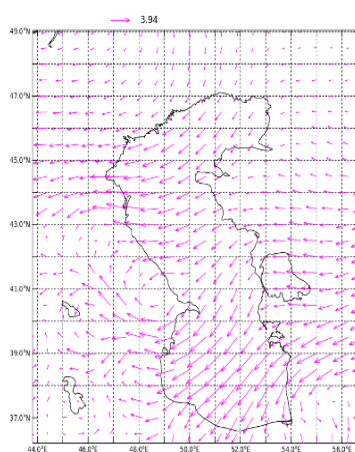
ی) سپتامبر ۲۰۱۷



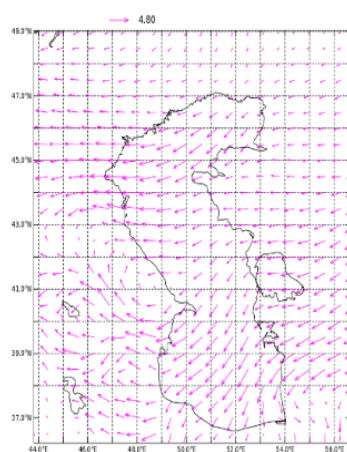
ه) اوت ۲۰۱۷



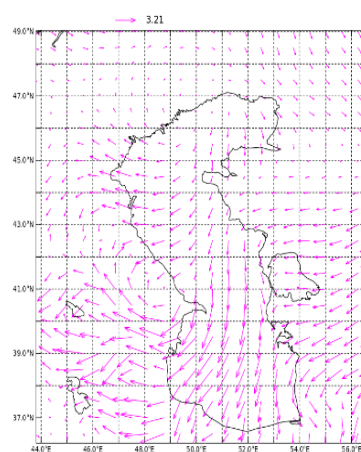
د) ژوئیه ۲۰۱۷



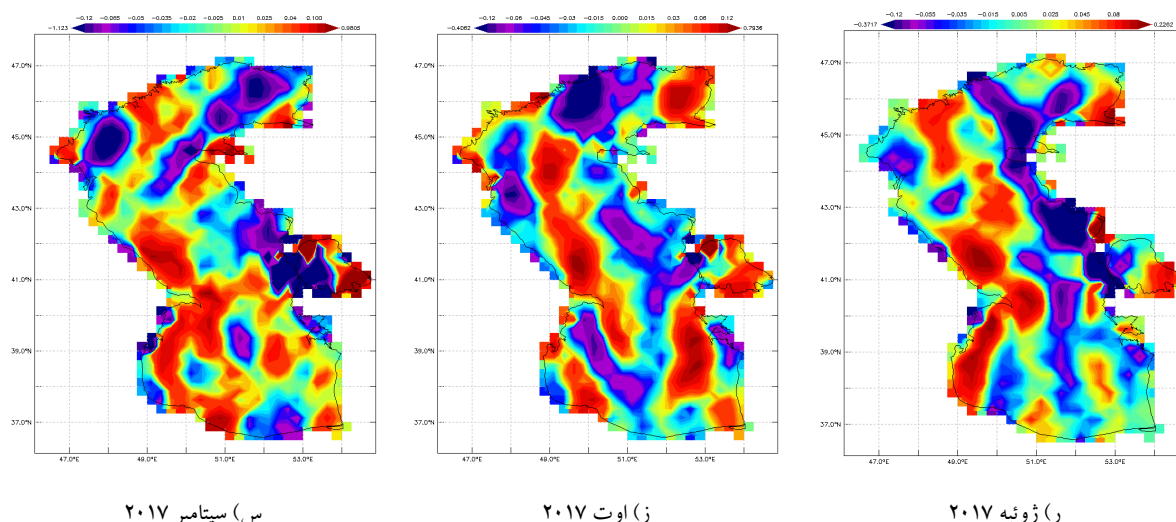
ج) سپتامبر ۲۰۱۷



ث) اوت ۲۰۱۷



ت) ژوئیه ۲۰۱۷



شکل ۷. الف تغییرات میانگین ماهانه میدان‌های کلروفیل  $(\text{mg}/\text{m}^3)$  (الف-ب-ج)، دمای سطح  $(^\circ\text{C})$  (د-ه-ی)، برای پدیده ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر ۲۰۱۷. تغییرات میانگین ماهانه باد سطحی  $(\text{m}/\text{s})$  (ت-ث-ج) و آنومالی مؤلفه سرعت نصف‌النهاری جریان سطحی  $(\text{m}/\text{s})$  (ر-ز-س) برای پدیده ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر ۲۰۱۷. رنگهای آبی و بنفش جریان جنوب‌سو (در ماه ژوئیه، شروع پدیده، قوی‌تراند) و قرمز جریان شمال‌سو را نشان می‌دهند.

نحوی شکوفایی جلبکی به‌همراه کلروفیل در ماه‌های اوت، سپتامبر و اکتبر ۲۰۱۵ و همین‌طور تابستان ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که شکوفایی در ماه اوت در بخش جنوب شرقی خزر شروع و سپس به درون خزر جنوبی سرایت کرده و سپس توسط جریان‌ها به خزر میانی و در نهایت در ماه اکتبر به خزر شمالی هم سرایت کرده است. البته نمونه سال ۲۰۱۸ دارای گسترش بیشتری در حوز جنوبی خزر داشته است. الگوی باد که اغلب شمال شرقی است شرایط فراچاهی را در سواحل شرقی خزر مهیا کرده و آب‌های سردتر و مغذی را به سطح می‌آورد. توزیع دما نیز نشان می‌دهد که در حین شکوفایی نوار ساحلی شرقی خزر سردتر است (نشان داده نشده، مشابه شکل ۷-د). آنومالی‌های ارتفاع‌سنجی سطحی و مؤلفه نصف‌النهاری جریان سطحی نیز پیچک‌های میان-مقیاس در حد ۵۰ کیلومتر و یا بیشتر را نشان می‌دهند (مشابه شکل‌های ۷-ر، ز، س). بنابراین نمونه ضرب پخش پیچکی (تلاطمی) افقی  $(K_H \sim U \times L)$  با سرعت مشخصه افقی  $U$  و مقیاس مشخصه  $L$ ، با توجه به نمونه سرعت‌های سطحی  $0.1$  متر بر ثانیه (شکل ۵)، اندازه پیچک‌های ۱۰۰ کیلومتر، حدود  $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$  را می‌دهد. این ضرب پخش افقی کافی است که جلبک شکوفایی شده را به سرعت در افق و کل

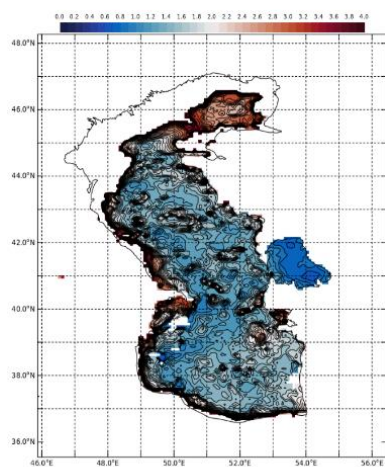
میدان‌های دمای سطحی آب (شکل‌های ۷-د، ه، ی) و بادهای سطحی (شکل‌های ۷-ت، ث، ج) نشان می‌دهد که باد عمدتاً در این ماه‌ها شمال شرقی بوده و شرایط فراچاهی را در سواحل شرقی خزر ایجاد کرده که منجر به دمای نسبتاً کم آب‌های این سواحل در بخش‌های میانی خزر، به‌خصوص در شروع این پدیده (ژوئیه) شده است. مواد مغذی حاصل از فراچاهش می‌تواند منبع مهم مواد مغذی برای شکوفایی محسوب می‌شود.

از ارتفاع‌سنجی سطح آب جریان‌های زمینگرد قابل استخراج است، و مؤلفه شمال-جنوبی جریان‌های سطحی در (شکل‌های ۷-ر، ز، س) آورده شده است. الگوهای جریان‌ها عمدتاً شمال-جنوبی است، به‌ویژه جریان‌های شمالی باعث انتقال منشاء شکوفایی از حوزه کم‌عمق شمالی خزر و مصب رود ولگا به حوزه میانی خزر شده و شرایط افزایش زیست‌توده آن را فراهم می‌کند.

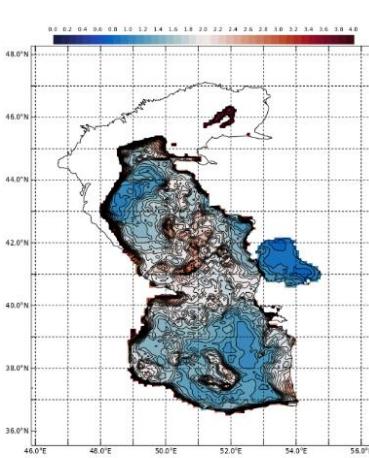
شکل ۸ نیز نمونه‌هایی دیگر از مرحله شروع، اوج و اضمحلال شکوفایی را برای تابستان ۲۰۱۵ و تابستان ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. در این مورد نیز الگوهای میدان‌های باد سطحی، دمای سطحی و جریان‌ها مشابه پدیده تابستان ۲۰۱۷ است و اینجا نشان داده نشده است. نمونه‌هایی از

حوزه خزر پخش کند، بخش عمیق تر حوزه خزر جنوبی را اگر ۲۵۰ (L) کیلومتر در نظر بگیریم زمان اختلاط در کل آن  $\tau \sim (L^2/K_h)$  حدود ۲ تا ۳ ماه خواهد بود. حرکات سطحی آب شمال و جنوب سوی (اینجا آورده نشده) نیز در این ماه‌ها مشهود بوده که انتقال نصف‌النهار را تسهیل و موجب انتقال کلروفیل می‌شوند. شکل ۱۰ نمونه‌هایی دیگر از تغییرات میانگین ماهانه

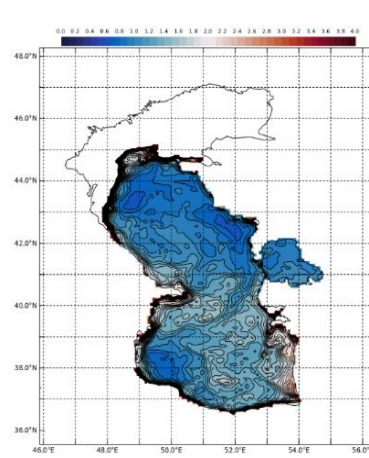
میدان‌های کلروفیل ( $mg/m^3$ ) برای پدیده ماه‌های اوت و سپتامبر ۲۰۲۰، و برای ماه‌های اوت و اکتبر ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها به نظر می‌رسد که عمدتاً شکوفایی در حوزه شمالی خزر شروع و به حوزه میانی سرایت می‌کند. البته در حوزه جنوبی، سوی جنوب شرقی، که آب‌ها کم‌عمق هستند شکوفایی کوچک‌تری ایجاد و به درون خزر جنوبی منتشر می‌شود.



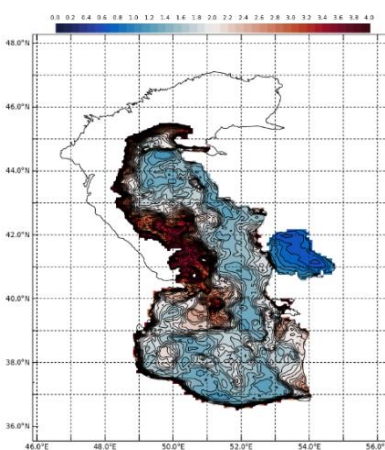
ج) اکتبر ۲۰۱۵-پخش



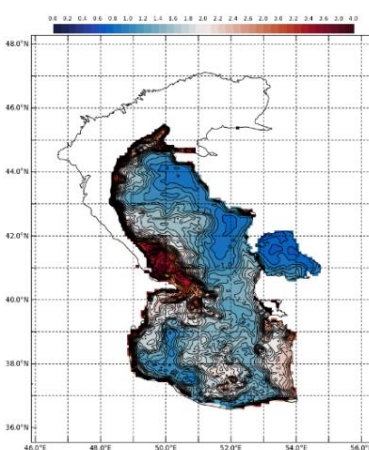
ب) سپتامبر ۲۰۱۵-اوج



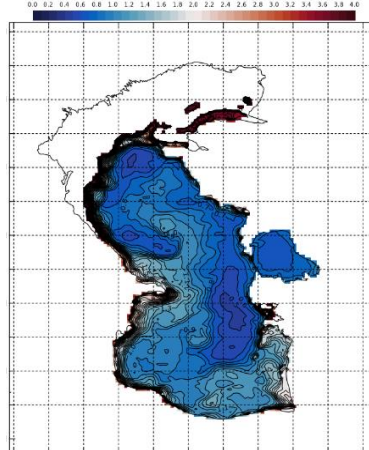
الف) اوت ۲۰۱۵-شروع



و) سپتامبر ۲۰۱۸-اوج

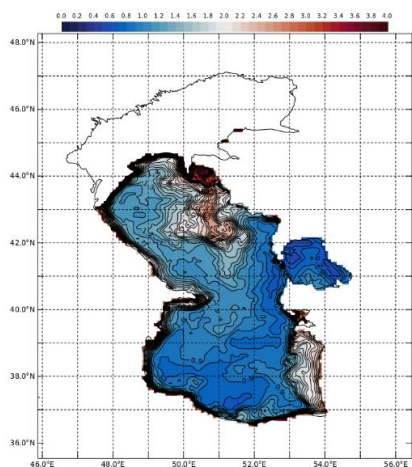


ه) اوت ۲۰۱۸-رشد

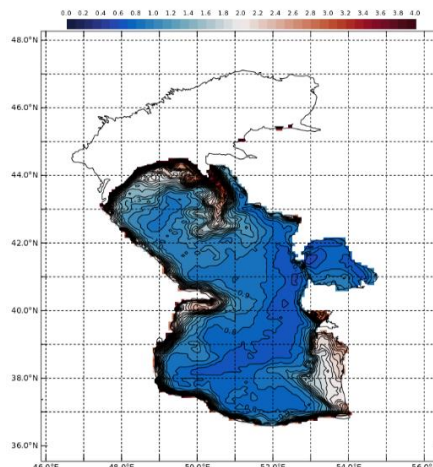


د) ژوئن ۲۰۱۸-شروع

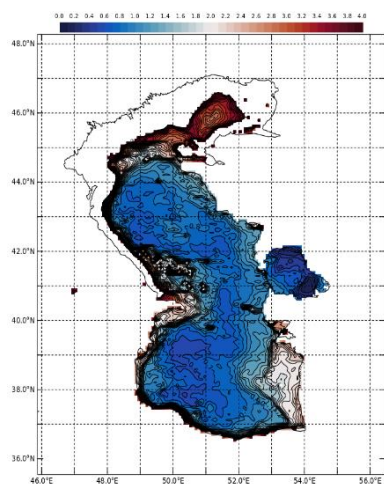
شکل ۸ نمونه‌هایی دیگر از تغییرات میانگین ماهانه میدان‌های کلروفیل ( $mg/m^3$ ) برای پدیده ماه‌های اوت، سپتامبر و اکتبر ۲۰۱۵ (الف، ب، ج)، و برای ماه‌های ژوئن، اوت و سپتامبر ۲۰۱۸ (د، ه، و).



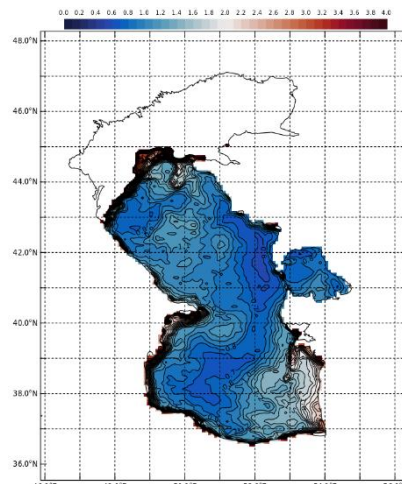
ب) سپتامبر ۲۰۲۰



الف) اوت ۲۰۲۰



د) اکتبر ۲۰۲۱



ج) اوت ۲۰۲۱

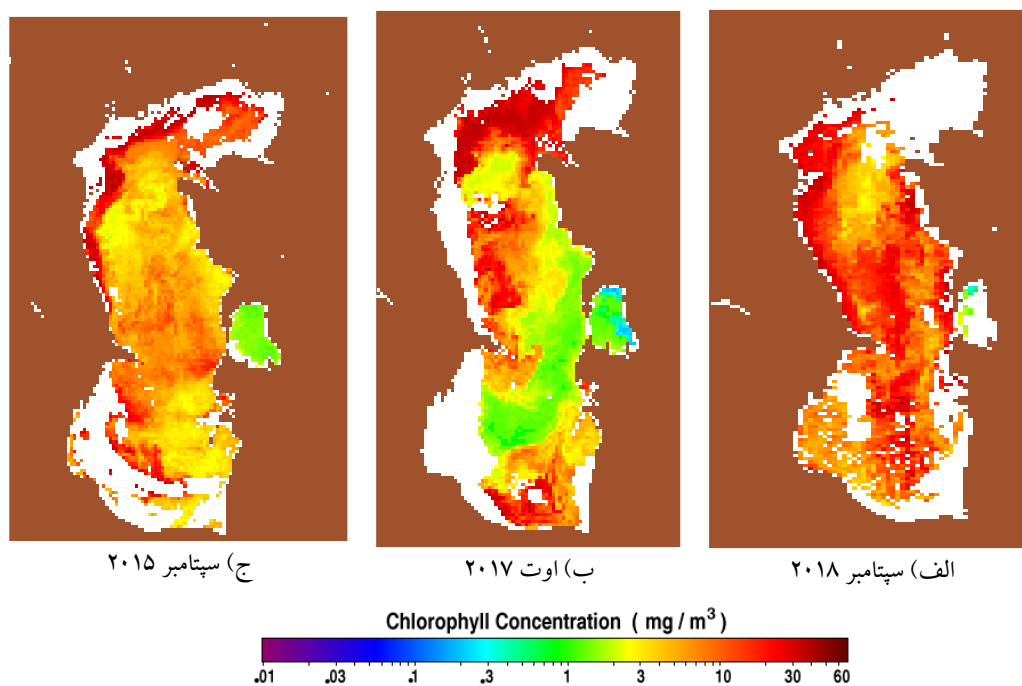
شکل ۱۰. نمونه‌هایی دیگر از تغییرات میانگین ماهانه میدان‌های کلروفیل ( $\text{mg/m}^3$ ) برای پدیده ماه‌های اوت و سپتامبر ۲۰۲۰ (الف و ب)، و برای ماه‌های اوت و اکتبر ۲۰۲۱ (ج و د).

تا ۱۴ نمودارهای هافمولر را برای خزر میانی و جنوبی در دوره مطالعه نشان می‌دهد. در این نمودارها پدیده‌های شکوفایی جلبکی که عمدتاً در حوزه میانی در اواخر تابستان، رخ داده‌اند از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ را به‌خوبی نمایان می‌کند (به‌خصوص در شکل ۱۴-الف). سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ دارای بیشترین غلظت کلروفیل و شکوفایی جلبکی بوده، به‌طوری‌که این پدیده به حوزه جنوبی خزر نیز سرایت کرده است. تغییرپذیری سالانه و همین‌طور تاحدی چندسالانه در غلظت کلروفیل و حتی جریان‌های شمال‌سو (شکل ۱۴-ب) به‌خوبی نمایان است. نتایج مشابهی نیز توسط لاوروا و همکاران (۲۰۲۴) به‌دست آمده است.

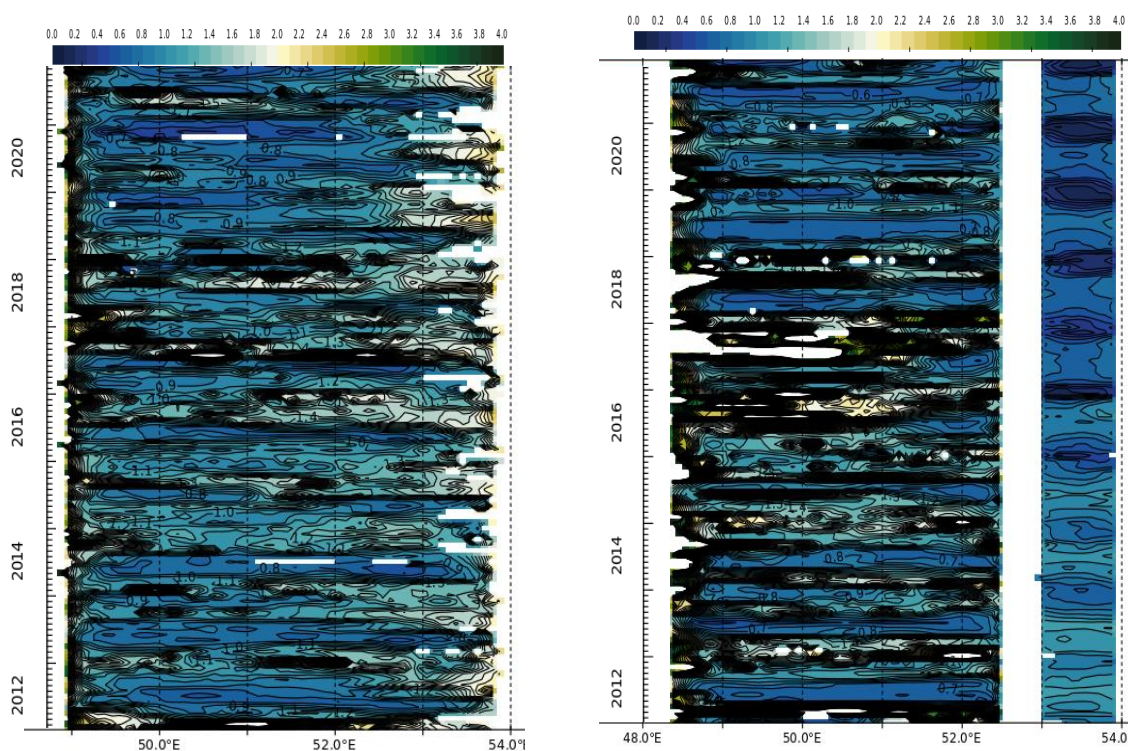
شکل ۱۱- الف، ب، ج نیز تصاویر ماهواره‌ای غلظت کلروفیل از ماهواره مودیس-۱ کوآ را نشان می‌دهد که با الگوهای غلظت که در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است قابل مقایسه است. این توزیع غلظت کلروفیل از تصاویر رنگ آب در طول موج‌های خاص (عمدتاً سبز و قرمز) به‌دست آمده است.

### ۳-۳. نمودارهای هافمولر تغییرات زمانی مکانی

برای کل دوره مورد مطالعه نمودارهای هافمولر برای خزر جنوبی و میانی در راستای نصف‌النهاری و نمودار هافمولر برای راستای مداری در اینجا ارائه می‌شود. شکل‌های ۱۲



شکل ۱۱. نقشه‌های توزیع غلظت کلروفیل از تصاویر ماهواره مودیس-اکوا (رنگ آب) برای ماه‌های (الف) سپتامبر ۲۰۱۵، (ب) اوت ۲۰۱۷ و (ج) سپتامبر ۲۰۱۸.



شکل ۱۲. نمودار هافمولر مداری تغییرات غلظت کلروفیل ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) حوزه میانی ( $42^\circ \text{N}$ ) برای ۲۰۱۲-۲۰۲۱، نوارهای سفید بخش‌های فاقد داده است.  
شکل ۱۳. نمودار هافمولر مداری تغییرات غلظت کلروفیل ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) حوزه جنوبی ( $38^\circ \text{N}$ )، (۲۰۱۲-۲۰۲۱).

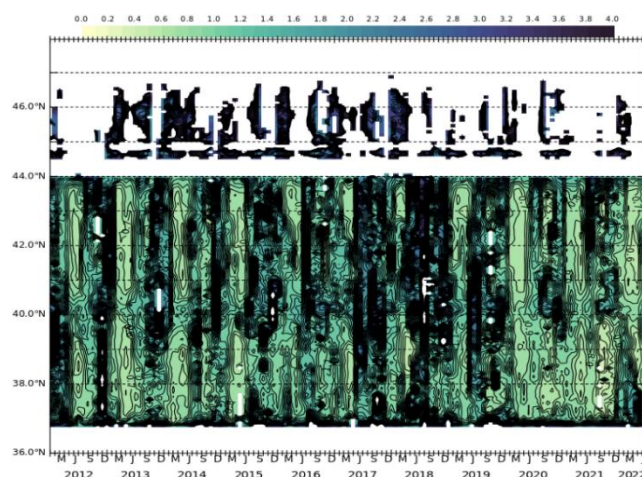
قسمت‌های مرکزی، و در خزر جنوبی بیشتر مناطق شرقی درگیر این پدیده هستند. البته با توجه به نمودار هافمولر

نمودارهای هافمولر نشان می‌دهد که در خزر میانی و جنوبی هرکدام تعدد رخداد آنها زیاد است و در خزر میانی بیشتر

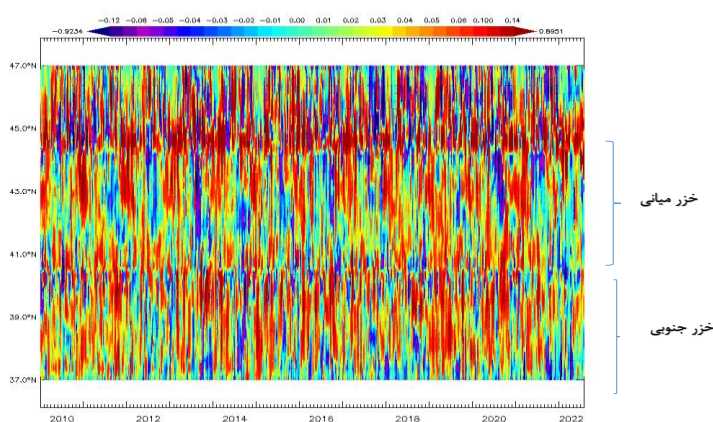
پهنای خزر میانی را ۴۰۰ کیلومتر در نظر بگیریم، این انتقال شمال-جنوبی حدود ۰/۴ سوردراپ (یک میلیون مترمکعب بر ثانیه) خواهد بود. اگر عمق لایه اکمن در دریای خزر میانی، که دارای لایه آمیخته‌ای به عمق حدود ۱۰ متر است، نیز ۱۰ متر باشد (این دور از انتظار نیست، چون زیر لایه آمیخته در دریای خزر یک ترموکلاین خیلی قوی وجود دارد که از انتقال تکانه به اعماق، به دلیل پایداری شدید (نمونه فرکانس شناوری ترموکلاین خزر حدود ۰/۱ بر ثانیه است که از مقادیر اقیانوس‌ها با حدود ۰/۰۱ بر ثانیه، خیلی بیشتر است) جلوگیری می‌کند). میانگین عمقی سرعت جریان ناشی از انتقال اکمن حدود ۰/۱ متر بر ثانیه خواهد بود که با اندازه جریان‌های شمال-جنوبی همخوان است (شکل ۱۴-ب).

شمال-جنوبی (شکل ۱۴-الف) هر تقریباً یک سال و نیم این پدیده، به‌خصوص در خزر میانی (محیطی که بیشتر مستعد فرایند فراچاهی است)، بیشتر و شدیدتر رخ می‌دهد و سپس به قسمت‌های دیگر از جمله خزر جنوبی سرایت می‌کند.

شکل ۱۴-ب نمودار هافمولر مربوط به تغییرات مؤلفه شمال‌سو جریان در راستای نصف‌النهاری را نشان می‌دهد، که مؤکد این است که تغییرات سرعت جریان شمال‌جنوبی در حوزه میانی بیشتر و شدیدتر است. این احتمالاً نتیجه انتقال اکمن در نتیجه بادهای مداری روی دریای خزر است. نمونه تنش باد روی دریا حدود ۰/۱ پاسکال است، بنابراین انتقال اکمن بر واحد عرض (بخش ۲) حوزه حدود  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  است. اگر



(الف)



(ب)

شکل ۱۴. (الف) نمودار هافمولر نصف‌النهاری تغییرات غلظت کلروفیل  $(\text{mg}/\text{m}^3)$  دریای خزر ( $51/5^\circ \text{E}$ )، (ب) نمودار هافمولر مربوط به تغییرات مؤلفه شمال‌سو جریان  $(\text{m}/\text{s})$  در راستای نصف‌النهاری، که نشان می‌دهد تغییرات سرعت در حوزه میانی بیشتر و شدیدتر است (۲۰۱۲-۲۰۲۱).

## ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از داده‌ها ماهانه و هفتگی و برخی تصاویر ماهواره‌ای، توزیع کلروفیل آ ایجاد شده با شکوفایی جلبکی به همراه تغییرات برخی پارامترهای مهم فیزیکی مؤثر بر آن در دریای خزر، برای زمان از حدود سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، بررسی شد. هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تغییرات بلندمدت بود و به این دلیل از داده‌های ماهانه و هفتگی استفاده شد. بعد از اخذ داده‌های و تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا سری‌های زمانی و تحلیل طیفی تغییرات زمانی به همراه همبستگی غلظت کلروفیل آ با سایر پارامترهای فیزیکی بررسی شد، سپس به تحلیل میدان‌های توزیع غلظت کلروفیل آ، دمای سطحی، باد و جریان‌ها به‌طور هم‌زمان در حوزه‌های شمالی، میانی و جنوبی دریای خزر پرداخته شد.

نتایج بررسی اولیه تغییرات زمانی و مکانی کلروفیل آ نشان داد که نوع اول شکوفایی که کلروفیل آ شروع به بیشتر شدن کرد، مکان‌هایی و زمان‌هایی بودند که دمای سطحی آب نسبتاً بالا و مواد مغذی زیاد (دهانه رودخانه‌ها بیشتر در سواحل شمالی و غربی خزر و مکان‌های فراچاهی، بیشتر در سواحل شرقی خزر) بود. معمولاً در مکان‌هایی با پدیده‌های شکوفایی، که غلظت کلروفیل زیاد داشتند در ماه‌های گرم سال مثل ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر، اکتبر رخ می‌دادند. البته گاهی در ماه‌های سرد سال نیز شکوفایی وجود داشت که به ظاهر نشانه جریان‌ها فرافتی و فرایند فراچاهی، به‌ویژه در سواحل به‌خصوص شرقی به‌همراه باد شمال شرقی بود.

معمولاً برای ماه‌هایی بعد از ماه‌های گرم، نیز بیشترین بی‌هنجاری غلظت کلروفیل آ، ناشی از فرارفت جریان‌های سطحی (حاصل جریان اکمن و جریان زمینگرد)، به‌ویژه شمال-جنوبی و پیچک‌های میان‌مقیاس، مشاهده می‌شد و درصد کمی هم ناشی از انتقال با رویدگی باد (Wind driven) (و احتمالاً جریان لختی، البته با توجه به این‌که داده‌های میانگین هفتگی جریان استفاده شده است این اثر اندک است) و فرایند فراچاهی اکمن و حرکات پیچکی

می‌باشد. به بیانی دیگر نقش گردش‌های سطحی در تغییر پذیری فصلی کلروفیل آ در دریای خزر بسیار مهم است. تحلیل سری‌های زمانی و طیفی غلظت کلروفیل آ و همین‌طور جریان سطحی (به‌ویژه مؤلفه شمال-جنوبی آن) در دو حوزه میانی و جنوبی نشان داد که این تغییرات دارای دوره‌های حدود چهارساله، یک‌ساله، شش‌ماهه و سه‌ماهه هستند. این دوره‌ها، به‌خصوص در حوزه میانی بسیار مشهودند. دوره‌های بلندمدت ۴-۵ ساله تغییرات احتمالاً ناشی از اثرات نوسانات دورپیوندی جو اقیانوس همچون انسو است (شکل‌های ۴ و ض-۱)؛ به‌ویژه النینو سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۵. اثرات این پدیده بزرگ مقیاس بر دریای خزر، به‌ویژه از نظر آب‌شناسی، نیز بررسی و محسوس بوده است (مثلاً لاهیجانی و همکاران، ۲۰۲۳). همبستگی تغییرات غلظت کلروفیل و قله هارمونیک‌های غلظت میانگین ماهانه آن در حوزه جنوبی حدود ۱۷ درصد مقدار میانگین حوزه میانی آن (با ضرایب همبستگی حدود ۴۰ درصد برای مقدار میانگین غلظت کلروفیل آ دو حوزه و ۶۷ در برای قله‌های طیفی آنها) است. این همبستگی نشان می‌دهد که غلظت کلروفیل آ بخش مرکزی حوزه جنوبی، که برای ایران مهم است، برای پدیده‌های فراگیر شکوفایی جلبکی، حدود ۲۰ درصد مقدار آن در حوزه میانی است. نتایج مشابهی نیز توسط لاوروا و همکاران (۲۰۲۴) به‌دست آمده است. همبستگی مؤلفه‌های باد سطحی و جریان سطحی نیز با غلظت کلروفیل آ، با معنی‌داری کم، وجود داشت. مؤلفه جریان شمال‌سو با غلظت کلروفیل آ طوری است که وقتی این مؤلفه جنوب‌سو است غلظت کلروفیل آ زیاد و بالعکس وقتی شمال‌سو است غلظت کلروفیل آ در حوزه-های میانی و جنوبی کم می‌شود.

نمودارهای هافمولر نشان داد که تغییرات سالانه و به‌ویژه فصلی کلروفیل آ در حوزه میانی بارزتر از حوزه جنوبی است این تغییرات تحت تأثیر جریان‌های شمال-جنوبی بودند که در طیف تغییرات آن نیز مشاهده شد. تغییرات غلظت کلروفیل آ در حوزه میانی نشان می‌دهد که پدیده‌هایی شکوفایی جلبکی با تولید زیست‌توده

## مراجع

- احسانی، ا. (۱۳۹۱). *ارزیابی صحت داده های دور سنجی اصول و روش ها*. چاپ اول، دانشگاه تهران.
- باباگلی، ج.؛ علی اکبری بیدختی، ع.ع. و سلمانی قزوینی، ز. (۱۳۹۷)، بررسی خواص فیزیکی و امواج بلند ساحلی خزر جنوبی. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۲(۳)، ۳۹-۵۲.
- ثمینی، ه.؛ علی اکبری بیدختی، ع.ع.؛ عظام، م. و ولی نسب، ت. (۱۴۰۰)، شبیه سازی عددی تغییرات فصلی پلانکتون ها و مواد مغذی در شمال دریای عمان با استفاده از مدل جفت شده ROMS-NPZD. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۲)، ۹۲-۷۱.
- حمزه‌ئی، ص.؛ صدیق مرتضوی، م.؛ علی اکبری بیدختی، ع.ع. و غیبی، ا. (۱۳۹۰) بررسی وقوع و گسترش کشند قرمز در خلیج فارس و دریای عمان با تحلیل داده های سنجنده MODIS، *مجله انسان و محیط زیست*، ۹(۳)، ۳۹-۴۸.
- مخلوق، آ.؛ نصرالله‌زاده ساروی، ح.؛ روحی، ا.؛ آقایی مقدم، ع.ع. و کیهان ثابتی، ع.ر. (۱۴۰۰)، تعیین پتانسیل شکوفایی جلبکی و کیفیت آب بر اساس غلظت کلروفیل-آ، تراکم و زی توده فیتوپلانکتون در مناطق ساحلی حوزه جنوبی دریای خزر (۹۸-۱۳۹۷). *مجله علمی شیلات ایران*، ۳۰(۱)، ۱۰۵-۹۳.
- مکارمی، م.؛ سبک آرا، ج. و میرزاجانی، ع.ر. (۱۳۹۰)، بررسی شکوفایی جلبک *Nodularia* (AAB) در حوضه جنوب غربی دریای خزر (محدوده آب های گیلان) سال های ۸۵ - ۱۳۸۴. *مجله علوم زیستی*، ۱۵(۱)، ۹۴-۷۹.
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Kutser, T., Vignudelli, S., & Kostianoy A., (2020). Spatio-Temporal Variability in Bio-Optical Properties of the Southern Caspian Sea, A Historic Analysis of Ocean Color Data. *Remote Sensing*. 12 (23), 3975.
- Al-Yamani, F., Bishop, J., Ramadhan, E., Al-Husaini, M., & Al-Ghadban, A. N., (2005). Oceanographic Atlas of Kuwait's Waters. Kuwait Institute for Scientific Research.
- Anderson, D. M., McGillicuddy, D. J., Keafer, B. A., He, R. & Townsend, D. W., (2010). Bloom dynamics of the red tide dinoflagellate *Alexandrium fundyense* in the Gulf of Maine: a synthesis and progress towards a forecasting capability ICES CM 2010/N: 01.
- Anderson, D. M., Townsend, D. W., McGillicuddy, D. J. & Turner, J. T., (2005). The Ecology and Oceanography of Toxic Alexandrium Blooms in the Gulf of Maine. *Deep Sea Research II*, 52, 19-21.
- Babagoli Matikolaei, J., Aliakbari Bidokhti, A., & Shiea, M., (2019). Some aspects of the deep abyssal overflow between the middle and southern basins of the Caspian Sea. *Ocean Sci.*, 15, 459-476.

قابل ملاحظه ای بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با شدیدترین آن در پاییز ۲۰۱۷، رخ داده است. با توجه به افزایش دمای محیط دریای خزر در اثر گرمایش جهانی، این محیط احتمالاً شکوفایی شدیدتری را در آینده تجربه خواهد کرد.

شکوفایی جلبکی (به همراه افزایش غلظت کلروفیل آ) در بیشتر موارد به نظر می رسد با بادهای سطحی و فرارفت جریان سطحی و فراچاهی ناشی از انتقال اکمن و دمای سطحی آب زیاد، تشدید می شود و عمدتاً با گردش های حوزه های سطحی و پیچک های میان مقیاس منتقل می شوند.

خزر شمالی و مناطق ساحلی، به ویژه سواحل خزر میانی عمدتاً دارای غلظت کلروفیل زیادی است که نشانه نقش مهم پساب ها از رودخانه هایی که به این حوزه آبی می ریزند، و شکوفایی جلبک های آبی در این حوزه، را به همراه دارند (مدبری و همکاران، ۲۰۲۰). نتیجتاً عمده کاری که کشورهای حاشیه این دریا می توانند، در جلوگیری از تولید بی رویه کلروفیل آ و کشند قرمز در خزر انجام دهند، جلوگیری از ریختن پسماند و موارد حاوی فسفات و مواد مغذی به این دریای آسیب پذیر می باشد.

استفاده از یک مدل عددی مثل ROMS نیز برای بررسی جزئیات بیشتر این پدیده نیز مفید خواهد بود.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از سازمان فضایی آمریکا (NASA) و اروپا (AVISO) برای فراهم کردن امکان دسترسی به داده های مورد نیاز قدردانی می شود، از داوران محترم این مقاله نیز قدردانی می شود.

- Banks, J. R., Heinold, B., & Schepanski, K., (2022). Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036618.
- Buskay, E. J., Montagna, P. A., Amos, A.F., & Whitledge, T.E., (1997). Disruption of grazer population as a contributing factor to the initiation of the Texas brown tide algal bloom. *Limnology & Oceanography*, 42, 1215-1222.
- Durand, D., Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Svendsen, E., Søiland, H., & Skogen, M. (2002). Satellite observation and model prediction of toxic algae bloom, Conference: Proceeding from the PORSEC Conference, At: Goa, India.
- Ghanea, M., Moradi, M., & Kabiri, K., (2016). A novel method for characterizing harmful algal blooms in the Persian Gulf using MODIS measurements. *Advances in Space Research*. 58(7),1348-61.
- Gill, A., (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics, International Geophysics Series 30, Academic Press.
- Harding, L. W., (1994). Long-term trends in the distribution of phytoplankton in Chesapeake Bay: roles of light, nutrients and streamflow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 104:267-291.
- Heuzé, C., Carvajal G.K., Eriksson LEB, & Soja-Woźniak M., (2017). Sea Surface Currents Estimated from Space-borne Infrared Images Validated against Reanalysis Data and Drifters in the Mediterranean Sea. *Remote Sensing*. 9(5):422.
- <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?per=DAY&day=16504&sub=level3&prm=CHL&set=10&ndx=0&mon=16467&rad=0&frc=0&dnm=D@M>
- <https://earth.nullschool.net/#current/wind/surface/level/orthographic=52.08,40.82,2908>
- <https://globalwindatlas.info/>
- Ibrayev, R. A., Özsoy, E., Schrum, C., & Sur, H. İ., (2010). Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Sci.*, 6, 311–329, <https://doi.org/10.5194/os-6-311-2010>.
- Lavrova, O. Y., Kostianoy, A. G., Bocharova, T. Y. & Storchkov, A. Y., (2024). Spatio-Temporal Variability of Algal Bloom in the Caspian Sea. *Ecologica Montenegrina*, 76, 14–48.
- Mozafari, Z., Noori, R., Siadatmousavi, S. M., Afzalimehr, H., & Azizpour, J., (2023). Satellite-based monitoring of eutrophication in the Earth's largest transboundary lake. *GeoHealth*, 7(5), e2022GH000770.
- Modabberi, A., Noori, R., Madani, K., Ehsani, A. H., Danandeh Mehr, A., Hooshyaripor, F., & Kløve, B., (2020). Caspian Sea is atrophying: The alarming message of satellite data. *Environmental Research Letters*, 15 (12), 124047.
- Kostianoy, Andrey G., Ginzburg, Anna I., Yu. Olga, Lavrova, Sergey, Lebedev, A., Mityagina, Marina I., Sheremetand, Nickolay A., and Soloviev, Dmitry M., (2019). Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature V. Barale and M. Gade (eds.), Remote Sensing of the Asian Seas.
- Lahijani, H. Leroy, S. A. G. Arpe, K. Crétaux, J. F., (2023). Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review, *Earth-Science Reviews*, 241, 104428, 10.1016/j.earscirev.2023.104428.
- Rahnemania, A., Aliakbari Bidokhti, A. A. and Babagoli J., (2022). Some physical properties of mesoscale eddies in the Caspian Sea basins based on numerical simulations'. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(40). 219-230.
- Rajan, A. & Al-Abdessalaam, T. Z., (2006). Harmful algal blooms and eutrophication. Nutrient sources, composition and consequences in the Arabian Gulf bordering Abu Dhabi Emirate. Proceedings 12th International conference on harmful Algal Blooms, Copenhagen, 2006.
- Roohi, A., Pourgholam, R., Ganjian Khenari, A., Kideys, E. A., Sajjadi, A. & Abdollahzade Kalantari, R., (2013). Factors Influencing the Invasion of the Alien Ctenophore Mnemiopsis leidyi Development in the Southern Caspian Sea, ECOPERSIA) International Journal of Natural Resources and Marine Sciences. *IJNRMS*, 1(3), 299-313.
- Sarangi, R. K. (2012). Observation of oceanic eddy in the northeastern arabian sea using multisensor remote sensing data. *International Journal of Oceanography*, 2012(1), 531982.
- Sarangi, R. K., Nayak, S., & Panigrahy, R. C. (2008). Monthly variability of chlorophyll and associated physical parameters in the southwest Bay of Bengal water using remote sensing data. *Indian Journal of Marine Sciences*, 37(3), 256-266.
- Sedigh Marvasti, S., Gnanadesikan, A., Aliakbari Bidokhti, A. A., Dunne, J. P., & Ghader, S., (2016). Challenges in modeling spatiotemporally varying phytoplankton blooms in the Northwestern Arabian Sea and Gulf of Oman. *Biogeosciences*, 13, 1049–1069.
- Sehat Kashani, S., Rahnama, M., Khoddam, N., Attarchi, S., (2022). The study of chlorophyll concentration behavior over southern coasts of Iran with an emphasis on the cold season of the year. *International Journal of Coastal, Offshore and Environmental Engineering (ijcoe)*, 7(3), 1-9.
- Smayda, T. J. (1997). Harmful algal blooms: their

ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnology and oceanography*, 42(5part2), 1137-1153.

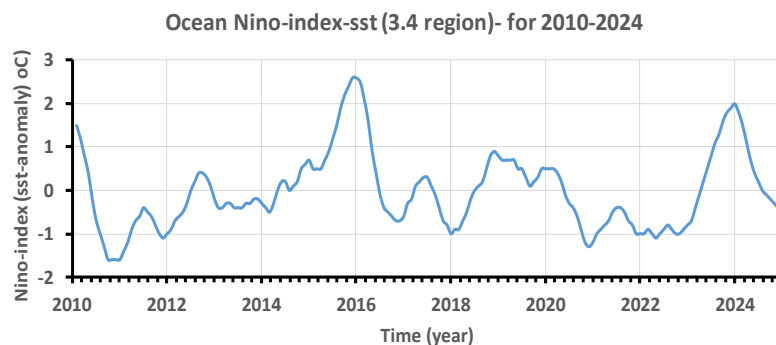
Sunda, W. G., Graneli, E. & Gobler C. J., (2006). Positive feedback and the development and persistence of ecosystem disruptive algal

blooms. *Journal of Phycology*, 42, 963-974.

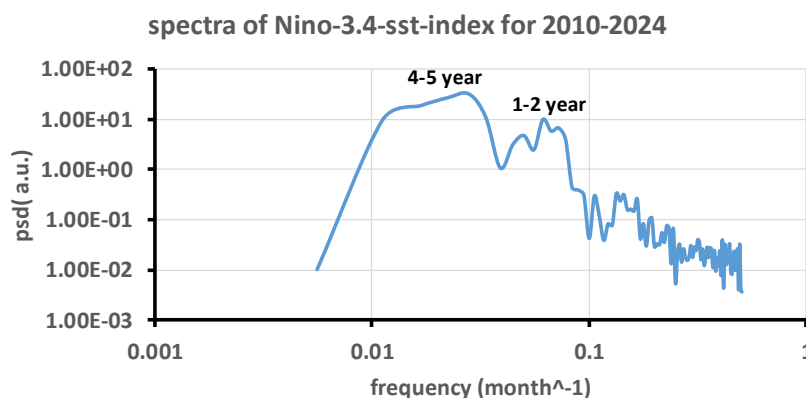
Tang, Q. S., Ying, Y.P. Wu, Q., (2016). The biomass yields and management challenges for the Yellow Sea large marine ecosystem. *Environ. Dev.*, 17 (2016), 175-181,

#### ضمیمه ۱

با توجه به اثر احتمالی نوسان جنوبی (ENSO) بر دریای خزر، سری زمانی میانگین ماهانه (بر اساس میانگین متحرک سه ماه) اندکس نینو اقیانوسی ۳/۴، (بی هنجاری دمای سطح اقیانوس در منطقه ۵-درجه شمالی-۵-درجه جنوبی و ۱۲۰-درجه تا ۱۷۰-درجه غربی) و طیف تغییرات آن در شکل ض-۱ (الف) و (ب) رسم شده است. در آن تغییرات ۴ تا ۵ ساله مشخص است که با تغییرات بلندمدت غلظت کلروفیل در دریای خزر (شکل ۴) همخوان است. یک الینو قوی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۷ وجود داشته است، و ظاهراً به دنبال آن یک شکوفایی قوی حوزه میانی خزر را در بر گرفته است. لازم به ذکر است که این اثر باید مجزا بررسی شود و تنها دوره بلند مدت تکرار آن در اینجا با سیکل تغییرات بلندمدت غلظت کلروفیل آ همخوان است.



(الف)



(ب)

شکل ض-۱. سری زمانی میانگین ماهانه (بر اساس میانگین متحرک سه ماه) اندکس نینو اقیانوسی ۳/۴، (بی هنجاری دمای سطح اقیانوس در منطقه ۵-درجه شمالی-۵-درجه جنوبی و ۱۲۰-درجه غربی تا ۱۷۰-درجه غربی) (الف)، و طیف تغییرات آن (ب). داده‌ها از مرکز پیش‌بینی اقلیمی آمریکا (مربوط به NOAA) به دست آمده است.