



Journal of Environmental Studies

Vol. 48, No. 2, Summer 2022

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Spatiotemporal Analysis of Harmful Algal Bloom (HAB) in the Strait of Hormuz and Identifying Abiotic Driving Forces

Document Type
Research Paper

Shahryar Fazli¹, Somayeh Sima^{*1}, Ali jafar Mousivand²

Received
August 2, 2021

1 Department of Water Resources Management Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Accepted
March 2, 2022

2 Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

DOI: 10.22059/jes.2022.327903.1008208

Abstract

Algal blooms in Iran's southern waterways, particularly in the Strait of Hormuz, have caused substantial economic and environmental damage during the previous two decades. Identifying acceptable remote sensing and numerical models for monitoring algal bloom, effective environmental factors, and analyzing the spatial-temporal pattern of algal bloom from 2003 to 2009 was the goal of this study. Chlorophyll concentration at high levels was considered as the major characteristic to indicate algal bloom, and its interaction with environmental factors such as sea surface temperature, salinity, aerosol optical thickness, and wind speed was explored for this purpose. Temperature and salinity were seen to be the most critical factors, with 22-27 ° C and 37.5 psu being the optimal temperature and salinity ranges for algal growth in the region, respectively. Between November and February, algal blooms are most likely to develop. Algal blooms are also more prevalent in the northern and central parts of the Strait of Hormuz than in other part. The results of this study can play an important role in preventing and controlling the damage caused by algae blooms in the region by developing early warning models.

Keywords: Chlorophyll, Remote sensing data, Surface temperature, Salinity, Correlation analysis

* Corresponding Author:

Email: s.sima@modares.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

In the past two decades, frequent Harmful Algae Bloom (HAB) events have occurred in the southern coast of Iran, particularly in the Strait of Hormuz. Because of the resultant environmental consequences and economic losses, it is of high importance to identify the key abiotic forces of HAB and their critical ranges to mitigate HABs.

Studies of algal blooms in the Strait of Hormuz over the past two decades show that *Noctiluca* has been the dominant algae. Regional studies show that nutrient concentrations are generally higher in the region in autumn than in winter and in winter than spring. Moreover, in early autumn upwelling in the east of the Strait of Hormuz and along the coasts of Iran causes the enrichment of coastal waters with nutrients, especially nitrate. On the other hand, the density gradient reduction between the Persian Gulf and Sea of Oman during the cold months, along with the loss of summer stratification due to air cooling in the region, leads to the mixing of water and nutrients in depth.

This study aims at 1) identifying the appropriate remote sensing-based algorithms and numerical models for monitoring HABs, 2) recognizing the key abiotic factors in the formation and expansion of HABs, and 3) understanding the spatiotemporal variation of long-lasting HABs and their effective abiotic factors from 2003 to 2019. The findings of this study can provide useful insights into the design of an early alarm system of HAB to prevent its negative environmental and economic consequences.

Materials and Methods

In this study, variations of abiotic variables affecting the formation of algal blooms in the Strait of Hormuz including sea surface temperature and salinity, aerosol optical thickness (AOT), and wind speed were analyzed during the three HABs between 2003 and 2019, having a duration of longer than two months. Concentration of Chlorophyll a has been considered as the main indicator of algal bloom. To detect algal blooms in many studies, different thresholds of chlorophyll concentrations from 2.5 to 25 mg/m³, for different levels of warning, have been mentioned in the Literature. Based on the field data and values obtained from satellite imageries at the time of algal bloom, a threshold of 5 mg/m³ for chlorophyll concentration was selected to determine the algal bloom event in the Strait of Hormuz.

Then, the performance of several numerical and remote sensing-based models for monitoring algal bloom and the aforementioned abiotic factors were assessed using Field data acquired from oceanographic, fisheries, geological and meteorological organizations. Several evaluation criteria including Wilmot agreement index (d), mean bias error (MBE), root mean square error (RMSE), and correlation coefficient (R) were used for validation of the models.

After selecting the best models for each variables, their monthly maps between 2003 and 2019 were extracted. Then, the lumped (mean values in the study area) and spatial (between maps) correlation analysis between chlorophyll-a concentration and the other abiotic variables were performed using Pearson correlation method at 95%. In addition, correlation analysis was performed without and with considering a one-month delay. Subsequently, the anomalies of these variables during the three algal bloom events were examined compared to their long-term mean monthly values. Likewise, spatial changes in the chlorophyll concentration were obtained from the selected model and the areas affected by algal bloom in the Strait of Hormuz were identified.

Discussion of Results

Based on the results of the performance indices, OC3M, OCSST, HYCOM and MERRA2 models were selected as the optimal models for monitoring chlorophyll, sea surface temperature, salinity, and wind speed, respectively.

In the first period, September 2008, the algal bloom was formed in the southwestern regions of the Oman Sea and through the east-west currents moved toward the northern shores of the Strait of Hormuz. By January 2009, it expanded and reached its peak in the interior part of the Persian Gulf.

The second event occurred in January 2012, just lasted about two months. The northern regions of the Strait, especially Qeshm Island as well as the coasts of Oman and the UAE were the most affected areas by algal blooms. In the third algae bloom episode, the upsurge in algal concentration has started from

the coastal areas of Oman and the UAE and quickly reached the central and western parts of the Strait of Hormuz in January 2015 and then reached its peak in the following month, especially in the southern parts of the Strait of Hormuz and UAE.

Regarding the long-term pattern of changes in chlorophyll concentration in the area (figure 1), it can be said that from 2006 to 2015, almost every three years, an algal bloom event lasting more than a month can be observed in the central areas of the strait. Also, in most of the years during the study period (except for the number of years 2001, 2002 and 2016), the mean chlorophyll concentration approached the threshold of algal bloom from November to January. Moreover, the eastern areas are more at risk of increasing chlorophyll concentration than the western. This could be due to lower temperatures, lower salinity and more available nutrient in the Oman Seas compared to the Persian Gulf.

The temporal variation of sea temperature and salinity in the west and east part of the Strait of Hormuz showed a slight increase in the peak values in the western regions compared to the eastern and central areas. AOT is almost the same in all the three regions, while wind speed follows an irregular trend in three areas. These changes are more evident in the western regions.

Due to the variations in the monthly mean of chlorophyll throughout the years 2003-2019 in the region, the lowest chlorophyll occurs in summer and increases with the beginning of autumn and lastly reaches its maximum in winter and then decreases until spring. This circulation pattern is common among subtropical waters. According to correlation analysis, while chlorophyll level has a significant direct correlation with salinity, it inversely correlates with sea surface temperature. In general, with falling temperature in autumn and winter, chlorophyll concentration rises in the Strait of Hormuz. Wind speed, which intensifies dust and the movement of sea currents, has a weak inverse relationship with chlorophyll. This means that in summer, when the highest degree of dust occurs in the region, the chlorophyll is negligible, and as the weather cools, the amount of dust in the region decreases. This seasonal pattern is known for aerosols for desert areas, including the Middle East.

Conclusions

The key results of this research are:

- 1- The optimum models for monitoring chlorophyll, sea surface temperature, salinity and wind speed in the Strait of Hormuz are OC3M, OCSST, HYCOM, and MERRA2 models, respectively.
- 2- Algae blooms are more likely to occur in the Strait of Hormuz between November and February.
- 3- The central and northern regions of the Strait of Hormuz are more prone to algal blooms than other regions due to more desired abiotic conditions for algae growth. Similarly, algal blooms are more likely to occur in the eastern than the western part of the Strait of Hormuz.
- 4- According to the study of the three algae bloom episodes having a duration of more than two months, the desired temperature and salinity ranges for algae growth are 22-27 ° C and 37.5-39 psu, respectively. Concurrent occurrence of these abiotic conditions highly increases the risk of algal blooms in the Strait of Hormuz.

The increased nutrient discharge from urban and industrial effluents together with a rise in water temperature and salinity due to the development of desalination plants will increase the risk of algal blooms in the southern coasts of Iran. Using the promising potential of satellite data (with an appropriate resolution) and valid algorithms, as shown in this study, can pave the way for developing regional early warning systems of algae bloom.

بررسی الگوی مکانی-زمانی شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز و شناسایی متغیرهای محیطی مؤثر بر آن

شهریار فضلی^۱، سمیه سیما^{۱*}، علی جعفر موسیوند^۲

^۱ گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۲ گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۵/۱۱

چکیده

در دو دهه اخیر، رخداد‌های متناوب شکوفایی جلبکی در آب‌های جنوبی ایران و به خصوص تنگه هرمز خسارات اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی به بار آورده است. این پژوهش با هدف شناسایی مدل‌های سنجش از دوری و عددی مناسب برای پایش شکوفایی جلبکی و متغیرهای محیطی مؤثر و تحلیل الگوی مکانی-زمانی شکوفایی جلبکی طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ انجام شد. به این منظور غلظت کلروفیل در مقادیر بالا به‌عنوان متغیر اصلی نشان‌دهنده شکوفایی جلبکی انتخاب شد و ارتباط آن با متغیرهای محیطی شامل دمای سطح آب، شوری، عمق اپتیکی ذرات معلق و سرعت باد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دما و شوری به ترتیب مهم‌ترین متغیرهای مؤثر هستند و محدوده دما و شوری مطلوب برای رشد جلبک‌ها در منطقه به ترتیب ۲۷-۲۲ درجه سانتی‌گراد و ۳۹-۳۷/۵ PSU می‌باشد. همچنین در بازه زمانی بین ماه‌های نوامبر تا فوریه بیشترین احتمال رخداد شکوفایی جلبکی وجود دارد. مناطق شمالی و مرکزی تنگه هرمز نیز نسبت به سایر مناطق بیشتر تحت تأثیر شکوفایی جلبکی قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعه با کمک به توسعه مدل‌های هشدار زودهنگام شکوفایی جلبکی می‌تواند در پیشگیری و کنترل خسارات ناشی از آن در منطقه نقش مهمی ایفا کند.

کلیدواژه‌ها: کلروفیل، داده‌های سنجش از دور، دمای سطح آب، شوری، تحلیل همبستگی

۱. سرآغاز

آبی عمدتاً در جهت تقویت زنجیره غذایی و رشد ارگانیسم‌های دریایی مفید بوده اما زمانی که رشد جلبک‌ها از حالت طبیعی خارج می‌شود، شکوفایی جلبکی^۱ یا کشند قرمز^۲ رخ می‌دهد که برای سلامت محیط‌زیست و اکوسیستم دریایی بسیار خطرناک است (Attaran-Fariman and Bolch, 2012). در دهه‌های اخیر پدیده شکوفایی جلبکی از جهت تعداد وقوع، شدت و توزیع جغرافیایی در

در سال‌های اخیر، با توسعه فعالیت‌های انسانی در نواحی ساحلی، آلودگی آب‌های ساحلی و دریایی در زمره یکی از چالش برانگیزترین مسائل محیط‌زیستی در جهان تبدیل شده است. فیتوپلانکتون‌های دریایی حدود ۹۵٪ تولیدات مواد اولیه غذایی آبزیان را در اقیانوس‌ها تأمین می‌کنند (Verlecar and Desai, 2004). رشد جلبکی در محیط‌های

زمستان و در زمستان بیشتر از بهار است و پدیده فراجوشی^۳ در اوایل پاییز در شرق تنگه هرمز و در امتداد سواحل ایران باعث غنی شدن آبهای ساحلی از مواد مغذی به ویژه نترات می‌شود. از طرفی کاهش گرادیان دانسیته بین خلیج فارس و دریای عمان طی ماه‌های سرد به همراه از بین رفتن لایه بندی تابستانه در اثر خنک شدن هوا در منطقه منجر به ایجاد اختلاط آب و مواد مغذی در عمق می‌شود (Mehrfar et al., 2020). فراهمی مواد مغذی در کل ستون آب، شکوفایی جلبکی و رشد فیتوپلانکتون‌ها را سبب می‌شود (INIOAS, 2021). به علاوه، کاهش دمای آب و شوری در منطقه تنگه هرمز طی ماه‌های ذکر شده منجر به ایجاد شرایط مطلوب زیستگاهی برای جلبک‌ها می‌شود که تداوم شکوفایی جلبکی را سبب می‌شود.

از جمله مطالعات میدانی صورت گرفته در خصوص شناسایی عوامل محیطی مؤثر بر این پدیده می‌توان به پژوهش Gurbisz و Kemp (۲۰۱۴) در مناطق مرکزی و شمالی خلیج چسپایک در مریلند امریکا اشاره کرد که نشان دادند که غلظت جلبک‌های سمی به‌طور مستقیم با دما، فسفات آلی و به‌طور معکوس با شوری و عمق آب ارتباط دارد و این پدیده عمدتاً در اواخر رخ می‌دهد. همچنین در مناطق عمیق اقیانوسی رشد فیتوپلانکتون‌ها تابع دو عامل حفظ لایه بندی در لایه‌های یوتروفیک بالایی و پدیده فراجوشی است (Li et al., 2000 and 2015). طی پدیده فراجوشی، بر اثر وزش باد و کاهش دما، انتقال عمودی لایه‌های زیرین آب که معمولاً خنک‌تر و حاوی مواد مغذی بیشتری می‌باشند به لایه‌های سطحی صورت می‌گیرد (Kämpf and Chapman, 2016). یا در مطالعه‌ای بر روی تاثیر همزمان دما، شوری و تابش خورشیدی بر شکوفایی جلبکی نشان دادند که نرخ رشد بهینه جلبک‌ها در محدوده‌ی دمایی ۲۶-۲۱ درجه سانتی گراد و شوری ۳۰-۳۶ psu مشاهده رخ می‌دهد (Kim et al., 2004).

بررسی‌ها نشان می‌دهد غلظت بالای ذرات معلق^۴ در اتمسفر ارتباط مستقیمی با نشست آن‌ها بر اقیانوس‌ها دارد

سطح دنیا افزایش قابل توجهی داشته‌اند که اقتصاد آن مناطق به‌خصوص در بخش شیلات را تحت تأثیر قرار داده است (Ritzman et al., 2018). تاکنون مطالعات گسترده‌ای در مناطق مختلف دنیا در خصوص شناخت عوامل مؤثر بر شکوفایی جلبکی به‌منظور پایش و پیش‌بینی این پدیده انجام گرفته است. این مطالعات شامل مطالعات آزمایشگاهی و میدانی از جمله (Raine et al., 2010; Park et al., 2013), (Wong et al., 2007; Llebott et al., 2010) و همچنین الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری (Vazyulya et al., 2014; Hill et al., 2020) بوده است. مدل‌های آزمایشگاهی و عددی به دلایلی چون پوشش ناقص از منطقه، زمان موردنیاز و هزینه اندازه‌گیری بالا و معادلات ریاضی پیچیده در مدل‌های عددی به‌ندرت برای پایش و پیش‌بینی شکوفایی جلبکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Blondeau et al., 2014). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با روش‌های دیگر ذکر شده مقرون‌به‌صرفه‌تر است (Hu, 2009). در سالیان اخیر تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بسیار بالا همچون مادیس، لندست و سنتینل در دسترس هستند. علاوه بر آن این تصاویر می‌توانند مناطقی را که دور از دست بشر بوده را پوشش دهند و شناسایی این پدیده را آسان‌تر نمایند (Zhao et al., 2014). مطالعات پیشین نشان می‌دهند که عوامل محیطی و فرآیندهای هیدرودینامیکی بسیاری بر روی شکل‌گیری و گسترش شکوفایی جلبکی در مناطق مختلف نظیر خلیج‌ها، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها و سایر محیط‌های آبی مؤثرند (Acevedo-Trejos et al., 2013) و غنی شدن آب‌ها از مواد مغذی به‌عنوان مهم‌ترین عامل رخداد شکوفایی جلبکی در مقیاس‌های وسیع شناخته شده است (Anderson et al., 2002). به‌علاوه، شکل‌گیری و گسترش آن همچنین تحت تأثیر عوامل محیطی نظیر دمای سطح آب، شوری و تابش نیز است (Glibert et al., 2018). نتایج "طرح کلان پایش اقیانوس شناسی خلیج فارس و دریای عمان" نشان می‌دهد که غلظت مواد مغذی عموماً در منطقه در پاییز بیشتر از

طی سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۷۰ حدود ۳۵ شکوفایی جلبکی با طول عمر چندروزه در مناطق مختلف تنگه هرمز ثبت شده است (Saraji et al., 2010). از میان رخدادهای اصلی شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز دو دهه اخیر، سه دوره با تداوم بالاتر از یک ماه می باشند. دوره نخست در سپتامبر سال ۲۰۰۸ از سواحل دریای عمان در ایران و کشور عمان شروع شد و سپس از طریق تنگه هرمز وارد خلیج فارس شد و حدود هشت ماه طول کشید (Richlen et al., 2010; Zhao et al., 2015). همچنین با توجه به گزارش‌های سازمان محیط‌زیست و شکوفایی جلبکی ایران دو شکوفایی دیگر در مقیاس کوچک‌تر دریای عمان و تنگه هرمز به ترتیب در زمستان سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ با طول دوره زمانی حدود دو ماه رخ داد (IHABDC, 2015). اطلاعات بیشتر در مورد شروع محل شکوفایی، نواحی تحت تأثیر و نوع جلبک غالب در جدول ۱ آمده است. شکوفایی‌های جلبکی با تداوم کمتر از ۱ ماه در طی این دوره مورد بررسی قرار نگرفته است.

(Guerzoni et al., 1999). رسوب گرد و غبار در سطح پهنه‌های آبی نیز می‌تواند آب را تا حدی از ریزمغذی‌هایی مثل آهن، نیترات و آمونیوم غنی سازد (Tian et al., 2020). در مطالعه‌ای با بررسی باندهای مختلف سنجنده سی و ایفس برای تحلیل ارتباط غلظت کلروفیل و شدت ذرات گرد و غبار در آب‌های شرق ایالت متحده، اثر مستقیم این ذرات بر ایجاد شکوفایی جلبکی در آب‌های با میزان کم کلروفیل در منطقه تأیید شده است (Schollaert et al., 2003). مطالعه‌ی دیگری در هند نیز میزان ذرات گرد و غبار، کلروفیل و باد سطح آب برای دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ به کمک داده‌های ماهواره بررسی شده که نتایج حاصل نشان داده است که افزایش بسیار کم میزان کلروفیل دریای عرب ناشی از افزایش میزان گرد و غبار بوده است (Kumar et al., 2010).

رخداد شکوفایی جلبکی در آب‌های جنوبی ایران سابقه طولانی دارد و در دوره‌های متعدد در نواحی مختلف به‌خصوص در تنگه هرمز گزارش شده‌اند. با توجه به گزارش‌های پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان

جدول ۱. مشخصات اصلی سه دوره شکوفایی جلبکی مورد مطالعه در تنگه هرمز (IHABDC, 2015)

نوع جلبک غالب	بیشترین ناحیه تحت تأثیر	ناحیه شروع	مدت تداوم	تاریخ شروع رخداد
C.polykrikoides	سواحل هرمزگان و امارت	سواحل کشور عمان	هشت ماه	سپتامبر ۲۰۰۸
Noctiluca	کوهستک، بندرعباس، رأس الخیمه، شارجه	سواحل کشور عمان و امارات	دو ماه	ژانویه ۲۰۱۲
Noctiluca	بندرعباس، سیرک، فجیره	سواحل کشور عمان	دو ماه و نیم	ژانویه ۲۰۱۵

پدیده فراجوشی (Zhao et al., 2014) در به وجود آمدن شکوفایی جلبکی در آب‌های جنوبی ایران مؤثر بوده‌اند. در این مناطق، Hamzei و همکاران (۲۰۱۱) با به‌کارگیری روش‌های تحلیل میزان گسترش شکوفایی جلبکی با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس در آب‌های خلیج فارس و دریای عمان نشان دادند که الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های از سنجنده‌های ماهواره‌ای دریایی و اقیانوسی کارایی مناسبی در پایش تغییر رنگ آب دریا و برآورد میزان غلظت و وسعت شکوفایی مضر جلبکی دارند. در همین

بررسی شکوفایی جلبکی طی دو دهه اخیر در تنگه هرمز نشان می‌دهد که عمده آن‌ها ناشی از شکوفایی جلبک نوکتیکولا بوده است (Saraji et al., 2010). این شکوفایی‌ها خسارات فراوانی از جمله آسیب به صنعت شیلات و توریسم و همچنین مشکلاتی را برای تأسیسات آب‌شیرین‌کن‌ها به همراه آورده‌اند (Al-Azri et al., 2012). طی بررسی‌های انجام شده عوامل مختلفی همچون افزایش دبی فاضلاب ورودی (Hamzei et al., 2012)، کمبود بارش، طوفان‌های گرد و غبار (Nezlin et al., 2010) و همچنین

۲۰۰۳). نتایج این بررسی با تعیین مؤثرترین متغیرهای محیطی در رخداد شکوفایی جلبکی و الگوی زمانی و مکانی ایجاد و گسترش آن در منطقه تنگه هرمز به‌عنوان یک آبراهه استراتژیک، می‌تواند کمک قابل‌توجهی به مدیریت کیفیت و برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از آب‌های ساحلی بکند.

۲. مواد و روش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

تنگه هرمز از مهم‌ترین پهنه‌های آبی جنوب ایران محسوب می‌شود که دریای عمان و خلیج فارس را طریق جریان‌های چرخشی معکوس دهانه خلیجی و جزر و مدی به یکدیگر مرتبط می‌کند (شکل ۱). اما این دو محیط آبی از لحاظ خصوصیات هیدرودینامیکی و محیطی همچون عمق، درجه حرارت، شوری، مواد مغذی و جریان‌های حاکم به‌عنوان دو اکوسیستم کاملاً مختلف شناخته می‌شوند (Dorgham and Moftah, 1989). بنابراین شناخت دقیق خصوصیات تنگه هرمز در تبادل آب‌های اقیانوس هند از طریق دریای عمان به خلیج فارس حائز اهمیت است.

تحلیل الگوی جریان‌های تبدالی بین دریای عمان و خلیج فارس حاکی از آن است که جریانی از سوی دریای عمان و پس از گذر از نواحی شمالی تنگه هرمز وارد خلیج فارس و سواحل ایران شده و در جهت پادساعت‌گرد حرکت کرده و با عبور از کشورهای حاشیه خلیج فارس از جنوب تنگه خارج می‌شود (شکل ۱) که این جریان در تابستان بخاطر تشدید اختلاف دانسیته بین دریای عمان و خلیج فارس، قوی‌تر و در زمستان و پاییز ضعیف‌تر شده و عمدتاً با ناپایداری دینامیکی همراه است (Hunter, 1983; Al Azhar et al., 2016). جریان ورودی به تنگه هرمز، آب‌های با شوری و دمای کمتر را تا بخش‌های غربی خلیج فارس که دارای شوری و چگالی بالایی هستند می‌برد و پس از تعدیل در آنجا نهایتاً از نقاط عمیق‌تر و جنوبی تنگه خارج می‌شود (Johns et al., 2003).

دمای هوا یکی از عوامل محیطی اصلی بوده و تأثیر

راستا، کارایی الگوریتم ارتفاع خط فلورسنس^۵ در برآورد غلظت کلروفیل در زمان رخداد شکوفایی جلبکی سال ۲۰۰۸ در تنگه‌ی هرمز توسط Moradi و Kabiri (۲۰۱۲) گزارش شده است. در ادامه، Zhao و Ghedira (۲۰۱۴) با پایش شکوفایی جلبکی سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ در منطقه تنگه هرمز، با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و مدل عددی HYCOM^۶ نشان دادند که منشأ شکوفایی جلبکی می‌تواند از مناطق دور از ساحل بوده و سپس به مناطق ساحلی گسترده شده باشد. همچنین منابع اصلی تأمین مواد مغذی را پدیده فراجوشی و نشست گرد و غبار به دست آوردند.

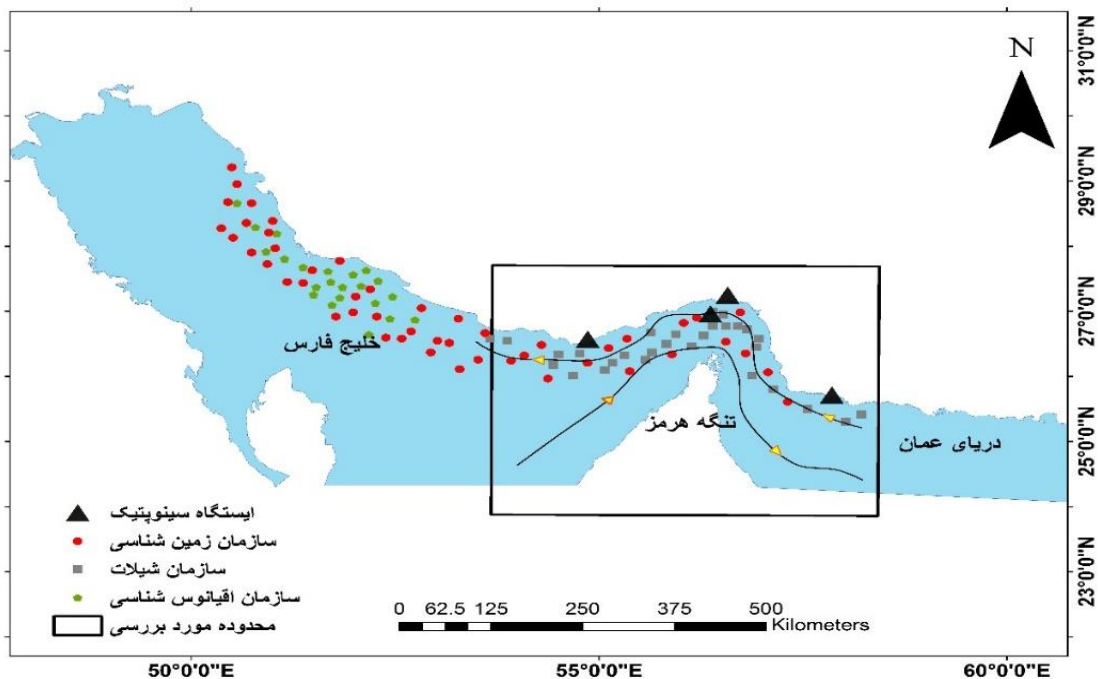
در مطالعات گذشته رخداد‌های شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز، کاستی‌هایی در خصوص مطالعه عوامل محیطی مؤثر بر شکوفایی جلبکی وجود دارد. علاوه بر این، این مطالعات عموماً بر روی بزرگ‌ترین رویداد شکوفایی جلبکی در منطقه تمرکز کرده و به سایر رخدادها نپرداخته‌اند. در مطالعه حاضر، به جای تمرکز روی یک سال خاص تغییرات متغیرهای محیطی مورد اشاره در تنگه هرمز طی ۱۷ سال بررسی می‌شود تا بتوان عوامل مؤثر بر غلظت کلروفیل و رخداد شکوفایی جلبکی را مؤثرتر بررسی نماید. در انتخاب مدل‌های پایش به‌جای به‌کارگیری یک مدل خاص، سعی شده بهترین مدل‌های موجود برای هر متغیر با داده‌های زمینی اعتبارسنجی شوند و سپس در مطالعه مورد استفاده قرار بگیرند. همچنین در اعمال آزمون همبستگی، بجای استفاده تنها از آزمون همبستگی هم‌زمان، این آزمون در مقیاس زمانی و مکانی هم‌زمان و با تأخیر برای درک بیشتر تأثیرگذاری متغیرهای محیطی بر غلظت کلروفیل استفاده شده است.

اهداف اصلی این مطالعه عبارت‌اند از ۱- مقایسه داده‌ها و مدل‌های مبتنی بر سنجش از دور به‌منظور پایش پدیده شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز، ۲- بررسی همبستگی متغیرهای محیطی مؤثر نظیر شوری، دما، غلظت ذرات معلق اتمسفر و سرعت باد با غلظت کلروفیل در تنگه هرمز و ۳- تحلیل الگوی تغییرات مکانی-زمانی متغیرهای محیطی مؤثر طی سه دوره رخداد شکوفایی جلبکی (در سال‌های ۲۰۱۹-

بیشتر می‌شود درحالی‌که در زمستان از سرعت این باد تقریباً کاسته می‌شود (Johns et al., 2003). میزان بارش در منطقه بسیار کم است و حدود ۷۰-۱۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است (Marcella and Eltahir, 2008). البته برخی اوقات میزان بارش‌های موسمی بر دریای عمان و شرق تنگه هرمز قابل‌توجه است. این بارش کم باعث شده است تا مناطق اطراف آن‌ها جز خشک‌ترین مناطق جهان و منبع اصلی غبار آئولین^۷ در جهان هستند و بادهای شدید در این مناطق اغلب همراه با طوفان‌های گرد و غبار می‌باشند (Husar et al., 1997). این طوفان‌ها بیشتر بین ماه‌های می تا جولای رخ می‌دهند (Pease et al., 1998)، به‌طوری‌که نشست گرد و غبار می‌تواند تا مقدار ۳۰ گرم بر مترمکعب نیز برسد (Rao and Al-Yamani, 1999). با توجه به کمبود بارش به‌خصوص در فصل تابستان، میزان گرد و غبار بین ماه‌های می تا اوت بیشترین میزان بوده و با سرد شدن هوا و افزایش نسبی میزان بارش و به‌تبع آن افزایش رطوبت خاک نواحی اطراف، میزان گرد و غبار در ماه دسامبر کمینه می‌شود.

زیادتی بر جریان‌های ناشی از گرادیان شوری و دمای آب تنگه هرمز دارد. به این ترتیب که در تابستان افزایش تبخیر و در نتیجه شوری در خلیج فارس توام با کاهش جریانات آب شیرین ورودی از بهمن‌شیر منجر به ایجاد جریان ناشی از اختلاف دانسیته از سمت دریای عمان می‌شود. متوسط دمای سالانه مناطق خشکی شمال تنگه هرمز بین ۲۴ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد از دسامبر ۱۹۹۶ تا مارس ۱۹۹۸ ثبت شده است. میانگین غلظت شوری در دهانه تنگه هرمز حدوداً ۲۷ psu است. با دور شدن از آن و حرکت به سوی خلیج فارس، میزان شوری افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده و به حدود ۴۱ psu در آب‌های غربی و جنوب غربی می‌رسد (Johns et al., 2003).

از جمله ویژگی‌های آشکار آب و هوایی این منطقه تابستان‌های گرم و درصد رطوبت بالای آن است. بادهای شمالی و غربی تقریباً در تمامی روزهای سال بخش عظیمی از تنگه هرمز و خلیج فارس و همچنین در زمستان دریای عمان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شدت این باد در اوایل بهار



شکل ۱- موقعیت تنگه هرمز، ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی متغیرهای هدایت الکتریکی، دمای سطح و عمق و ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده مورد مطالعه

تشکیل و تداوم شکوفایی جلبکی طی سه دوره در تنگه هرمز (جدول ۱) و مقایسه آن با میانگین بلندمدت هفده‌ساله

۲.۲. روش تحقیق

در این مطالعه به بررسی تغییرات متغیرهای مؤثر بر

گذشته، متغیرهای شوری و دمای سطح آب، عمق اپتیکی ذرات معلق (نماینده‌ی شدت گرد و غبار) و سرعت باد به‌عنوان عوامل مؤثر بر شکل‌گیری آن در نظر گرفته شده‌اند. جدول شماره ۲، مشخصات داده‌های سنجش‌ازدور و مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. در انتخاب مدل‌ها سعی شده است که از الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور و مدل‌های عددی به‌صورت توأم استفاده شود. همچنین استفاده از مدل‌های کالیبره شده برای منطقه که طی مطالعات قبل کارایی آن‌ها به اثبات رسیده باشد برای مقایسه مدنظر قرار گرفت. برای هر متغیر حداقل دو محصول و یا مدل انتخاب شد.

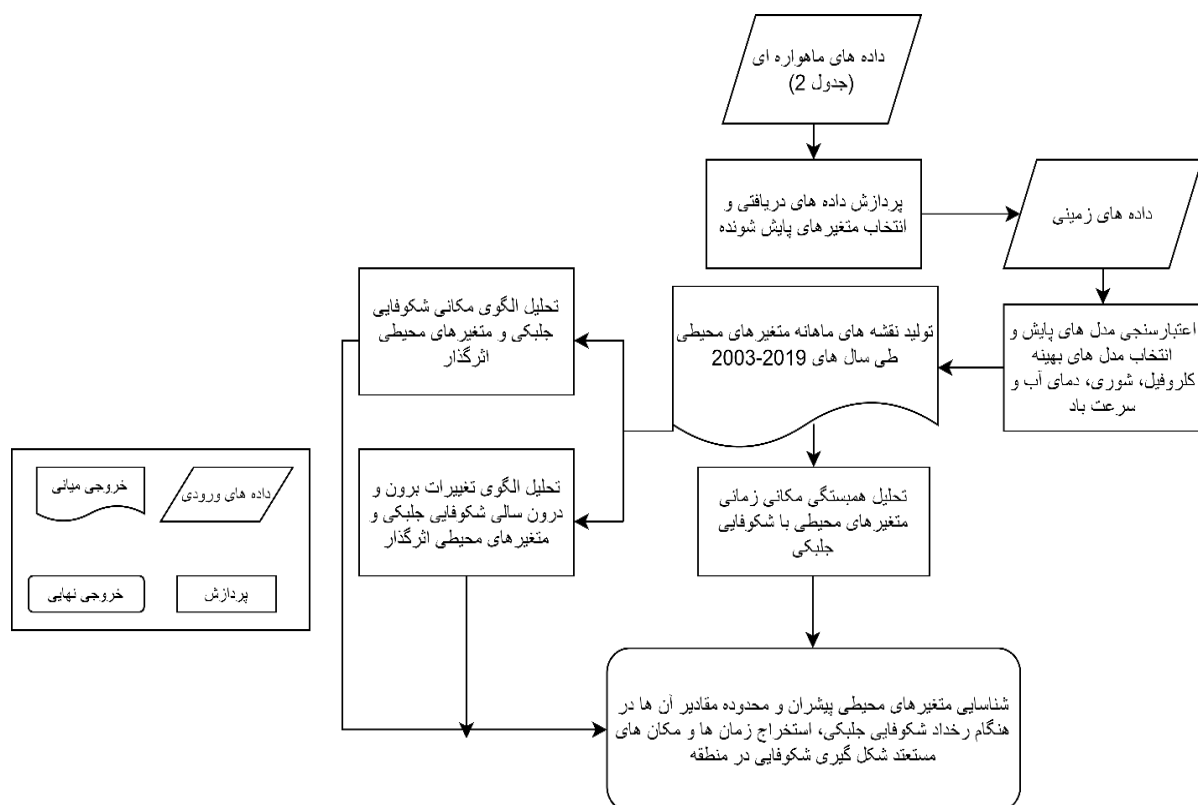
برای کلروفیل، شوری و دما علاوه بر محصولات ذکرشده در جدول ۲ از مدل‌های توسعه داده شده ذیل استفاده شده است.

(۲۰۱۹-۲۰۰۳) پرداخته می‌شود. روند کلی تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای تشخیص شکوفایی جلبکی در مطالعات مختلف حدود آستانه‌های مختلفی از ۲,۵ تا ۲۵ میلی‌گرم بر مترمکعب کلروفیل در سطوح مختلف هشدار ذکر شده است (از جمله: Kasich et al., (2014), NHMRC (2005) و Chorus and Bartram, (1999). با توجه به مشاهدات میدانی و مقادیر به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه در زمانهای رخداد شکوفایی جلبکی، حد آستانه غلظت کلروفیل ۵ میلی‌گرم بر مترمکعب به‌عنوان حد آستانه و شاخص شکوفایی جلبکی (Kasich et al., 2014) انتخاب گردید.

۱.۲.۲. توسعه مدل‌ها

در این تحقیق غلظت کلروفیل آ به‌عنوان شاخص اصلی برای شناخت شکوفایی جلبکی و با توجه به مطالعات



شکل ۲- روند مطالعه بررسی الگوی مکانی-زمانی شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز و شناسایی متغیرهای محیطی مؤثر بر آن

جدول ۲- مشخصات مدل‌ها و داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این مطالعه

متغیر	مدل منطقه‌ای	داده/ محصول	منبع داده/ سنجنده/ مدل	قدرت تفکیک مکانی/ زمانی		
کلروفیل	Tayebi and saradjian, 2013	MODIS L1b	سنجنش از دور/ MODIS	۴ کیلومتر/ ۱ روز		
		MODIS Chl_ocx,				
دمای سطح آب		MODIS SST				
		MCSST				
عمق اپتیکی ذرات معلق		MODIS_AOT at 869nm				
	Alabbadi, 2013	MODIS L1b				
شوری سطح دریا		HYCOM sea water salinity	مدل عددی/ HYCOM	۹ کیلومتر/ ۱ روز		
سرعت باد		NOAA CDR: Ocean Near-Surface Atmospheric Properties	سنجنش از دور/ NOAA	۲۸ کیلومتر/ ۳ ساعت		
		Merra Model_M2TMNXFLX	مدل عددی/ Merra2	۰/۵*۰/۶۲۵ درجه/ ۱ ساعت		

ذکر است که برای استفاده از این رابطه در کاربردهای عملیاتی می‌بایست ضرایب محلی برای منطقه (با استفاده از داده‌های مستقل) مجدداً کالیبره شوند.

مدل MCSST^۹: این مدل بر اساس الگوریتم پنجره گسسته است که به دلیل استفاده از زاویه میل ماهواره و تصحیحات اتمسفری از دقت قابل توجهی برای برآورد دمای سطح برخوردار است که مدل آن به شکل رابطه (۳) است.

$$MODIS_{Sst} = C_1 + C_2 * T_{31} + C_3 * T_{3132} + C_4 * (Sec(\theta) - 1) * T_{3132} \quad (3)$$

که در آن: T_{31} دمای درخشندگی باند ۳۱، T_{3132} اختلاف دمای درخشندگی در دو باند ۳۱ و ۳۲، و θ زاویه دید ماهواره (درجه) می‌باشد. برای محاسبه و کالیبره کردن آن بر اساس مدل MCSST، از ضرایب کالیبراسیون مدل^{۱۰} ECMWF استفاده شده است (Brown and Minnett, 1999).

۲.۲.۲. داده‌های زمینی مورد استفاده

برای اعتبارسنجی مدل‌های پایش و شناسایی کلروفیل، شوری، دمای سطح آب و سرعت باد از داده‌های CTD^{۱۱} سازمان‌های اقیانوس‌شناسی، شیلات، زمین‌شناسی و هواشناسی که به ترتیب در بازه‌های زمانی ژوئن ۲۰۱۱ الی جولای ۲۰۱۲،

مدل Tayebi و Saradjian (۲۰۱۳): این مدل تجربی

با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس و داده‌های زمینی کلروفیل در منطقه تنگه هرمز به شکل رابطه (۱) به دست آمده است.

$$\log(Chl) = -10.868 + 0.014(\log(R_{rs}(3)))^4 - 1.185 \log(R_{rs}(1)) + 0.06(\log(R_{rs}(14)))^4 - 9.201 \log(R_{rs}(15)) - 0.123(\log(R_{rs}(15)))^4 \quad (1)$$

که در آن $R_{rs}(\lambda)$ مقدار بازتابش مربوط به طول موج λ است.

مدل Alabbadi (۲۰۱۳): این مدل توسط روش

GAOT^{۱۲} و تصاویر سنجنده مادیس مدل، را برای برآورد شوری آب‌های ساحلی کشور تایوان ارائه شده است. این مدل از بازتابش باندهای یک، سه، چهار و پنج این سنجنده استفاده می‌کند که مدل آن به شکل رابطه (۲) است.

$$SSS_{MODIS}(psu) = 29.9 - 2.4 \left[\left(\frac{R_{rs(3)}}{R_{rs(5)} - R_{rs(3)}} \right) + (R_{rs(1)} - R_{rs(4)}) \right] + R_{rs(5)} \quad (2)$$

که در آن $R_{rs}(i)$ مقدار بازتابش مربوط به باند i ام است. در این مطالعه به علت محدودیت داده‌های موجود، از رابطه اصلی بدون اصلاح ضرایب استفاده شده است. لازم به

Wicks, 1980). هرچقدر که میزان این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده فاصله کمتر مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی می‌باشد (Hsiao et al., 2009). دو شاخص میانگین انحراف خطا و جذر میانگین مربع خطا نیز نشان‌دهنده خطای مجموع اختلاف میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده می‌باشد. هرچقدر هر دو شاخص به صفر نزدیک‌تر باشند دقت پیش‌بینی بالاتر است. ضریب R نیز میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده را نمایش می‌دهد که در حالت ایده آل یک می‌باشد (Homaei et al., 2002).

۴.۲.۲. تحلیل همبستگی و شناسایی متغیرهای موثر

پس از انتخاب مدل‌های مناسب، نقشه‌های ماهانه هر متغیر بین سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ استخراج شد. سپس تحلیل همبستگی متغیرهای محیطی با غلظت کلروفیل، با روش همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری ۹۵٪ به دو صورت انجام شد: ۱) متوسط مقادیر در محدوده مورد مطالعه (۲ پیکسل به پیکسل طی دوره زمانی (همبستگی مکانی). تحلیل همبستگی بدون تأخیر و با تأخیر زمانی یک‌ماهه صورت پذیرفت. علت انجام آزمون با تأخیر، لحاظ کردن تأثیر دیرنگام برخی عوامل محیطی بر غلظت کلروفیل می‌باشد (Nezlin et al., 2010). برای بررسی شدت همبستگی مقادیر ضریب همبستگی به چهار کلاس بسیار قوی و قوی (۴/۰ تا ۱)، متوسط (۳/۰ تا ۴/۰)، ضعیف (۲/۰ تا ۳/۰) و ناچیز (۱/۰ تا ۲/۰)، طبقه‌بندی شد (Wernet et al., 2008). معیار بررسی نیز به این شکل است که متغیرهای محیطی با ضریب همبستگی بالا در سطح معنی‌داری ۹۵٪ به‌عنوان متغیرهای موثر که برای مدل‌های پیش‌بینی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، معرفی شدند. همچنین به‌منظور محاسبه میزان همبستگی مکانی متغیرهای مورد مطالعه با کلروفیل در تنگه هرمز، همبستگی پیرسون بین داده‌های ماهانه متغیرهای مطالعه با غلظت کلروفیل طی دو دوره زمانی ۲۰۰۸-۲۰۰۹ (دارای شکوفایی جلبکی شدید) و طی سال‌های ۲۰۱۹-

فوریه و مارس ۲۰۰۹، ژانویه و فوریه ۲۰۰۸ و مارس ۲۰۰۸ الی مارس ۲۰۱۵ اندازه‌گیری شده‌اند، استفاده شده است (شکل ۱). لازم به ذکر است که از ایستگاه‌های هواشناسی بندرعباس، جزیره قشم، بندر جاسک و لنگه برای دریافت داده‌های سرعت باد استفاده شده است.

۳.۲.۲. اعتبارسنجی و ارزیابی مدل‌ها

خروجی مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری زمینی اعتبارسنجی شد. با توجه به اینکه در مجاورت محدوده مطالعاتی ایستگاه زمینی پایش ذرات معلق (Aeronet) به‌منظور اعتبارسنجی ذرات معلق وجود نداشت، امکان اعتبارسنجی این متغیر فراهم نبود. لازم به ذکر است تنها در قسمت اعتبارسنجی مدل‌ها از داده‌های روزانه استفاده شده است و در سایر بخش‌ها داده‌های ماهانه به کار گرفته شده است. پس از اعتبارسنجی، مدل‌ها مقایسه و مدل مناسب برای پایش متغیر مدنظر انتخاب شده و در ادامه مطالعات مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌ها از شاخص‌های توافق ویلموت ($d=IA^2$)، میانگین انحراف خطا (MBE^2)، جذر میانگین مربع خطا ($RMSE^2$) و ضریب همبستگی (R) که به ترتیب در روابط ۴ الی ۷ ارائه شده‌اند، استفاده شده است که در آن‌ها y_0 داده‌های مشاهداتی (زمینی)، y_i داده‌های محاسباتی و n تعداد زوج داده‌ها می‌باشد.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_0 - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_0 - \bar{y}_0| + |y_i - \bar{y}_i|)^2} \right] \quad (4)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_0 - y_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_0 - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^n (y_0 - \bar{y}_0)(y_i - \bar{y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (y_0 - \bar{y}_0)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (7)$$

شاخص توافق ویلموت پارامتری توصیفی بوده که مقادیر آن بین عدد یک و منفی بی‌نهایت قرار دارند (Willmott and

منظور سه تصویر ماهانه غلظت کلروفیل برای زمان‌های ابتدا، اوج و انتهای شکوفایی جلبکی هر دوره انتخاب شدند. با توجه به بررسی بهتر مکان‌های شروع و گسترده‌گی شکوفایی جلبکی، بخشی از نواحی غربی دریای عمان و شرقی خلیج فارس نیز در نقشه‌ها گنجانده شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. بر مبنای مقادیر شاخص‌های ارزیابی، مدل‌های OC3M، OCSST، HYCOM و MERRA2 به ترتیب به‌عنوان مدل‌های بهینه برای پیش‌کروویل، دمای سطح آب، شوری و سرعت باد با داده‌های میدانی متغیرهای ذکر شده انتخاب شدند.

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده مطالعه با داده‌های زمینی

تعداد زوج داده‌ها	R(**)	RMSE(*)	IOA(**)	MBE(*)	مدل	متغیر
۹۰	۰/۹۰	۲/۰۶	۰/۹۴	-۰/۳۶	MODIS- OC3M	کلروفیل (mg/m^3)
	۰/۷۴	۴/۲۵	۰/۸۱	-۰/۹۳	Tayebi and Saradjian (2011)	
۹۶	۰/۹۳	۱/۳۳	۰/۹۷	-۰/۱	OCSST	دمای سطح آب ($^{\circ}C$)
	۰/۸۰	۲/۸۶	۰/۸۷	-۰/۷۸	MCSST	
۱۰۱	۰/۹۱	۱/۷۴	۰/۹۵	-۱/۰۲	HYCOM	شوری سطح آب (psu)
	۰/۸۱	۲/۵۱	۰/۸۹	۰/۶۶	Alabbadi(2013)	
۱۰۰	۰/۹۱	۳/۳۱	۰/۹۵	-۰/۵۵	NOAA CDR	سرعت باد (m/s)
	۰/۸۶	۰/۳۷	۰/۹۱	۰/۱۳	MERRA2	

مدل‌های بهینه پررنگ شده‌اند. **بدون واحد * واحد خود متغیر

۲۰۱۶ (تقریباً بدون شکوفایی جلبکی) صورت گرفت. لازم به ذکر است که این آزمون از ماه ژوئن آغاز و تا می سال بعد ادامه دارد.

۲.۲.۵. تحلیل الگوی تغییرات مکانی-زمانی کلروفیل و متغیرهای محیطی اثرگذار

جهت بررسی روند تغییرات زمانی کلروفیل و متغیرهای موثر، میانگین ماهانه هفده‌ساله متغیرها محاسبه و با تغییرات آن‌ها طی سه دوره شکوفایی جلبکی منتخب مقایسه شدند و ناهنجاری‌ها^۵ طی سه دوره شکوفایی جلبکی نسبت به میانگین‌های ماهانه بلندمدت متغیرها مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین به منظور شناخت مناطق تحت تأثیر شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز از الگوی تغییرات مکانی غلظت کلروفیل حاصل از مدل منتخب استفاده شد. به این

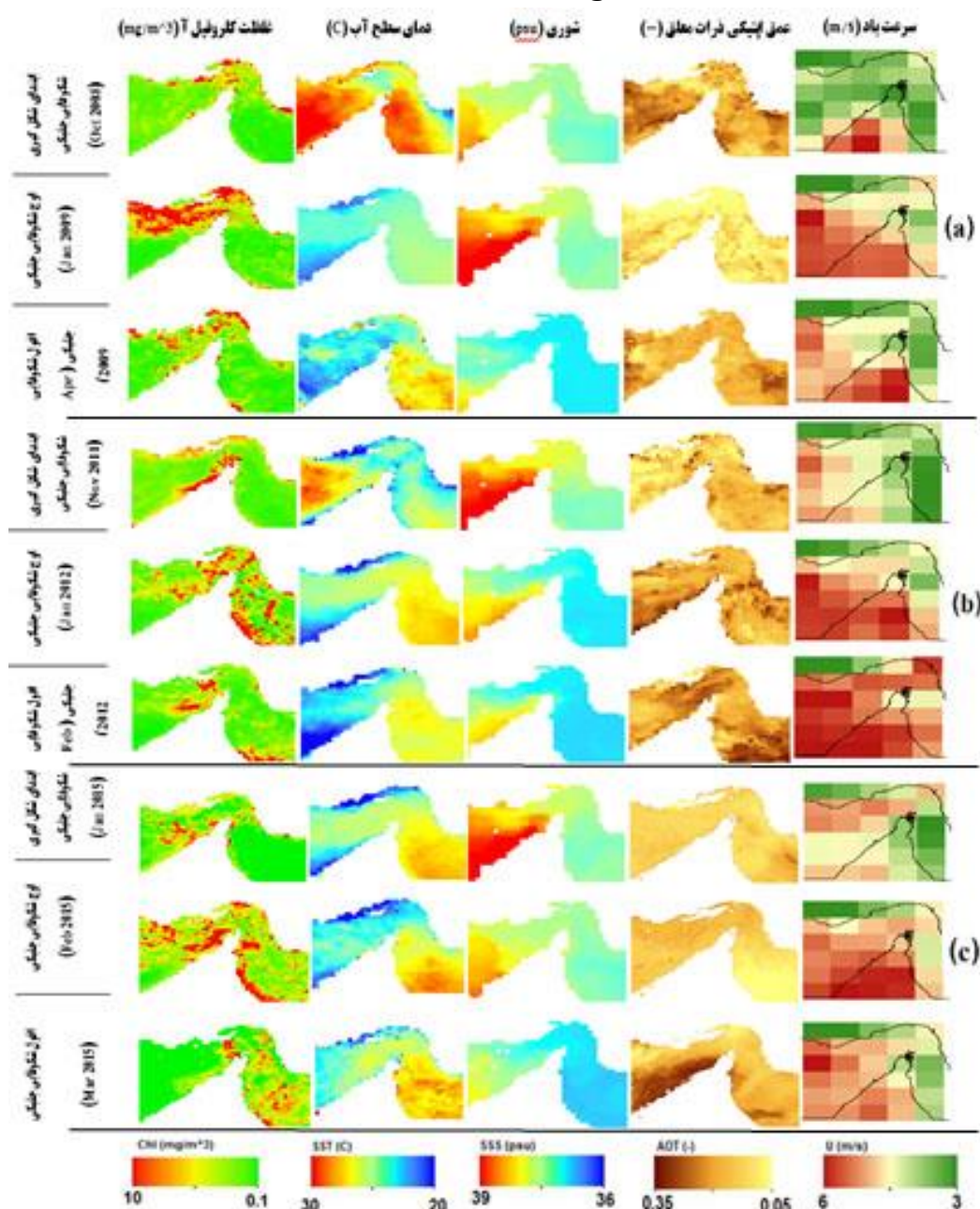
et al., 2015) همخوانی دارد. با آغاز ماه اکتبر تصاویر نشان می‌دهند که کلروفیل موجود در آب منطقه افزایش یافته است و در حال فراگیری محدوده تنگه است. این افزایش در سه منطقه شرقی تنگه، بندرعباس و جزیره قشم نسبت به مناطق مرکزی تنگه بیشتر نمایان است. با توجه به شرایط اقلیمی و جریان‌های فصلی تنگه هرمز به نظر می‌رسد با کاهش آرام دما شرایط رشد پلانکتون‌ها فراهم شده است. دما در این نواحی در حد ۲۹-۳۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۷ psu می‌باشد. با شروع فصل زمستان در ماه ژانویه میزان غلظت

۳.۱. بررسی الگوی مکانی شکوفایی جلبکی و متغیرهای محیطی اثرگذار

در دوره نخست (شکل ۵a)، لکه‌های شکوفایی جلبکی نخست در سپتامبر ۲۰۰۸ در مناطق جنوب غرب دریای عمان مشاهده شده و پس از قرار گرفتن در جریان‌های شرق به غرب آن به سمت سواحل شمالی تنگه هرمز حرکت کرده است. این حرکت تا ژانویه ۲۰۰۹ به سمت مناطق داخلی خلیج فارس پیشروی داشته است تا به اوج خود رسیده است که با مطالعات پیشین (از جمله Zhao et al., 2010; Richlen et al., 2010)

باشد. در ماه آوریل نیز شکوفایی جلبکی در اکثر مناطق به‌جز مناطق شمالی تنگه در حال کاهش می‌باشد. این افول را می‌توان به دلیل افزایش اندک دما در این ماه و افزایش سرعت جریانات تنگه با شروع فصل بهار و به‌تبع آن وارد شدن آب‌های با شوری کمتر به تنگه هرگز از دریای عمان دانست. در مناطق ساحلی بندرعباس و قشم هنوز شکوفایی پابرجاست که دلیل آن را می‌توان به غنی‌تر بودن، شوری متعادل و سرعت جریان کمتر نسبت سایر مناطق بیان کرد.

کلروفیل در تمامی مناطق به بیشترین مقدار خود می‌رسند، به‌طوری‌که در نواحی سواحل شمالی غلظت کلروفیل روزانه تا ۴۰ میلی‌گرم بر مترمکعب نیز مشاهده شده است. در این شرایط دما به کمترین مقادیر یعنی ۲۲-۲۳ درجه سانتی‌گراد و شوری نیز به بالای ۳۸ psu در مناطق شمالی و غربی می‌رسد. در این دوره غلظت کلروفیل مناطق مرکزی کمی کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از حرکت این فیتوپلانکتون‌ها توسط جریانات تنگه به سمت خلیج فارس



شکل ۵- نقشه میانگین ماهانه غلظت کلروفیل، دمای سطح آب، شوری، عمق اپتیکی ذرات معلق و سرعت باد در زمان‌های شکل‌گیری، اوج و افول شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز طی سه دوره ۲۰۰۸ (a)، ۲۰۱۲ (b) و ۲۰۱۵ (c) در تنگه هرمز

کمتری از شکوفایی جلبکی را به خصوص در مناطق شرقی تنگه هرمز مشاهده نمود.

تفاوت عمده دوره نخست با دوره‌های بعد در میزان غلظت کلروفیل، وسعت شکوفایی و مدت‌زمان تداوم آن می‌باشد. دوره نخست از ابتدای مشاهده شکوفایی جلبکی تا انتهای آن حدود هشت ماه طول کشیده است درحالی‌که این زمان برای دوره‌های دوم و سوم حدود دو ماه می‌باشد. در دوره‌های دوم و سوم شکوفایی جلبکی عموماً وارد خلیج فارس نشده است و تنها محدود به دریای عمان و تنگه هرمز بوده است. در اوج زمان شکوفایی جلبکی در دوره نخست حدود ۲۵۰۰۰ کیلومتر مربع غلظت کلروفیل بالای ۵ میلی‌گرم بر مترمکعب را تجربه کرده‌اند درحالی‌که این مساحت برای دو دوره بعدی به ترتیب برابر با ۱۷۱۰۰ و ۸۸۰۰ کیلومتر مربع بوده است. همچنین طی این زمان حداکثر میزان غلظت کلروفیل مشاهده شده در سه دوره به ترتیب برابر با ۵۰/۲، ۳۳/۳ و ۳۵/۵ میلی‌گرم بر مترمکعب بوده‌اند. ابتدای شکل‌گیری شکوفایی جلبکی دوره نخست دریای عمان مشاهده شده است و به سرعت به سواحل ایران و تنگه هرمز وارد شده است که با مطالعات Moradi و Kabiri (۲۰۱۲) و Zhao و Ghedira (۲۰۱۴) مطابقت دارد. همچنین برای دو دوره بعدی مشاهده می‌شود که علاوه بر دریای عمان، بخش‌هایی از سواحل کشور امارات نیز در ابتدای شکل‌گیری نقش داشته‌اند و در عرض مدت کمی شکوفایی جلبکی عمدتاً در نواحی ساحلی ایران، امارات و عمان گسترش یافته‌اند اما همچون سال ۲۰۰۸ وارد به‌طور محسوس وارد خلیج فارس نشده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر سه دوره، با کاهش اختلاف شوری نواحی شرق و غرب تنگه هرمز، رخداد شکوفایی جلبکی پایان می‌یابد.

۲.۳. بررسی الگوی تغییرات فصلی شکوفایی جلبکی و

متغیرهای محیطی مؤثر

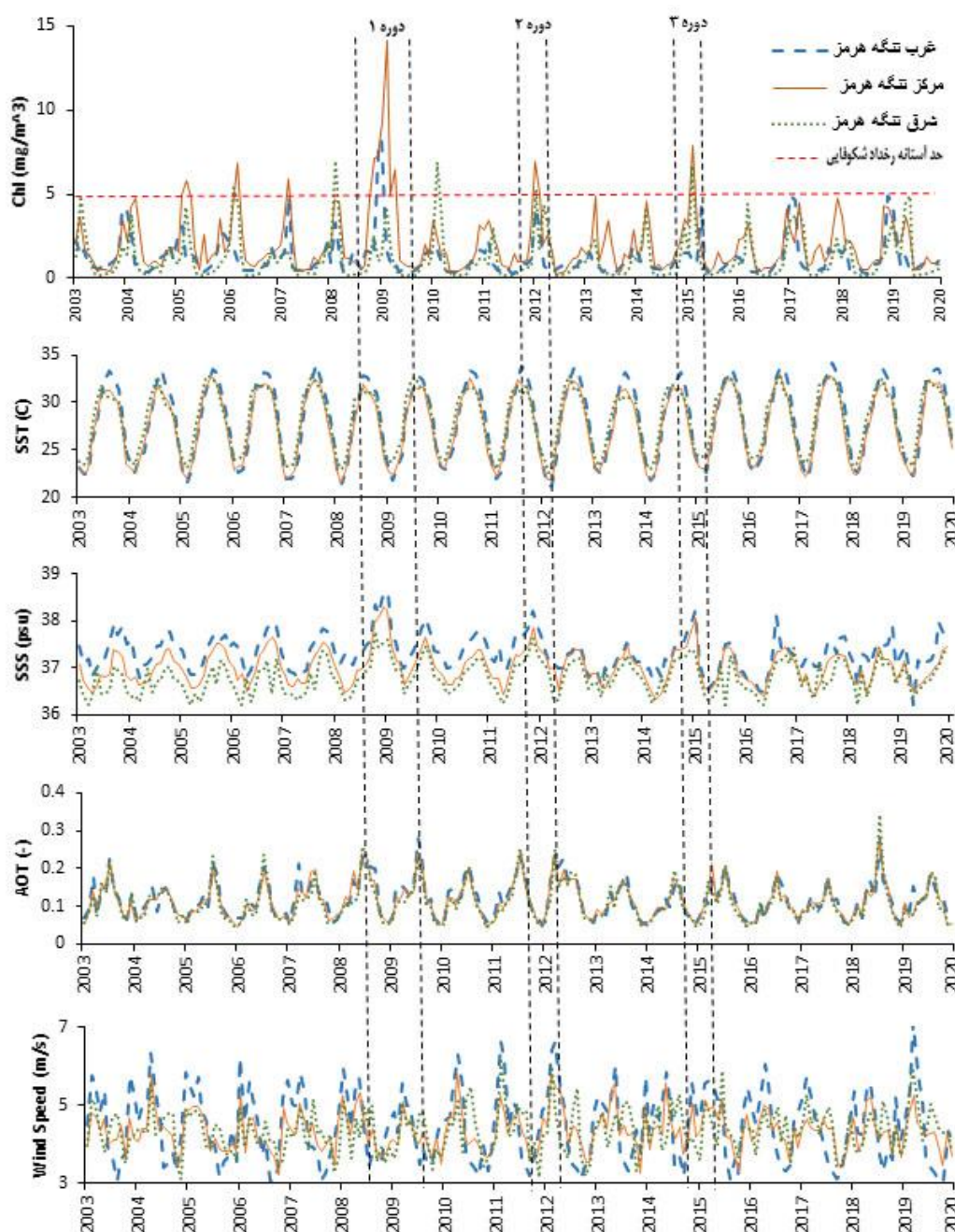
۲.۳.۱. الگوی تغییرات برون سالی

متوسط غلظت کلروفیل در سه ناحیه شرقی، مرکزی و

در دوره دوم (شکل ۵b)، برخلاف دوره قبل، مدت‌زمان شکوفایی طولانی نشده و تنها حدود دو ماه به طول انجامید. مناطق شمالی تنگه به خصوص جزیره قشم و همچنین سواحل عمان و کشور امارات بیشترین مناطقی بودند که دچار شکوفایی جلبکی شدند. میانگین شوری و دمای سطح در منطقه مورد مطالعه طی دوران شکوفایی جلبکی به ترتیب بین ۳۷-۳۸ و ۲۴-۲۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. نکته قابل‌ذکر برای کوتاه بودن این دوره از شکوفایی می‌توان کمتر بودن میانگین غلظت کلروفیل منطقه طی اوج شکوفایی (۵ میلی‌گرم بر مترمکعب) نسبت به دوره قبل و همچنین دیرتر تشکیل شدن آن و ورود به فصل بهار و افزایش دمای سطح آب و کاهش میزان شوری که با بیشتر شدن جریانات ورودی شکل می‌گیرد، بیان نمود. در دوره سوم (شکل ۵c)، با توجه به جدول (۱) افزایش غلظت جلبک‌ها از دو ناحیه سواحل کشور عمان و امارات آغاز شده است و به سرعت در ماه ژانویه به نواحی مرکزی و غربی تنگه هرمز رسیده‌اند و سپس در ماه بعد به اوج شکوفایی به خصوص در مناطق جنوبی تنگه هرمز و سواحل امارات رسیده است. در ماه مارس با توجه به میانگین غلظت کلروفیل ۲ میلی‌گرم بر مترمکعب شکوفایی جلبکی در منطقه به‌طور کامل به‌جز لکه‌ای در مناطق مرکزی و سواحل عمان به پایان رسیده است. در این دوره نیز که حدوداً دو ماه طول کشید، مقدار غلظت کلروفیل میانگین منطقه تا ۶ میلی‌گرم بر مترمکعب نیز رسید. همچنین طی این دوران میانگین دمای سطح و شوری آب منطقه به ترتیب در محدوده ۲۴-۲۱ درجه سانتی‌گراد و ۳۷/۵-۳۸ تغییر کردند. نکته قابل‌ذکر در مورد عمق اپتیکی ذرات معلق این است که توزیع مکانی آن در هر سه دوره متغیر است و نمی‌توان الگوی منظمی برای تغییرات مکانی آن در نظر گرفت. سرعت باد نیز در زمان شکل‌گیری شکوفایی جلبکی معمولاً کمترین حالت بوده است و در زمان اوج آن در مناطقی که بیشترین غلظت کلروفیل را داشته‌اند، سرعت باد کمتر از سایر مناطق بوده است. اما با شروع کاهش غلظت کلروفیل در مناطقی که سرعت باد بیشتر بوده‌اند، می‌توان آثار

۲۰۱۵، تقريباً هر سه سال يكبار، يك رخداد شكوفايي جلبكي با تداوم بيش از يك ماه در نواحي مركزي تنگه را مي توان مشاهده نمود. همچنين تقريباً در بيشتر سالها طي دوره بررسي (به جز از تعدادي از سالهاي ۲۰۰۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶) ، متوسط غلظت كلروفيل به حد آستانه شكوفايي جلبكي نزديك شده است و تهديد رخداد شكوفايي جلبكي تقريباً هرساله در اين منطقه طي ماههاي نوامبر تا ژانويه وجود دارد.

غربي تنگه هرمز (شكل ۶) نشان مي دهد كه در سه دوره رخداد شكوفايي جلبكي متوسط غلظت كلروفيل در نواحي مركزي تنگه هرمز به شكل قابل ملاحظه اي بيش از متوسط سالانه بوده است. در نواحي غربي و شرقي با توجه به سرعت بيشتر جريانات اقيانوسي فيتوپلانكتونها شانس كمترى براي ماندگاري و شكوفايي گسترده نسبت به مناطق مركزي پيدا مي كنند. در خصوص الگوي بلندمدت تغييرات غلظت كلروفيل در منطقه مي توان گفت از سال ۲۰۰۶ تا



شكل ۶- نمودار تغييرات غلظت كلروفيل و متغيرهاي محيطي در نواحي غربي، مركزي و شرقي تنگه هرمز طي سالهاي ۲۰۰۳-۲۰۱۹

۳.۲.۲. الگوی تغییرات درون سالی

با توجه به تغییرات میانگین ماهانه کلروفیل طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ در منطقه (شکل Va) کمترین غلظت کلروفیل در تابستان رخ می‌دهد و با شروع فصل پاییز غلظت افزایش می‌یابد و نهایتاً در زمستان به بیشترین مقدار خود می‌رسند و سپس تا بهار افول می‌کند. این روند گردشی در بین آب‌های نیمه گرمسیری متداول است (Longhurst, 1995). بیشترین و کمترین غلظت متوسط ماهانه کلروفیل طی دوره مورد بررسی به ترتیب حدود ۴ و ۰/۷ میلی‌گرم بر مترمکعب مربوط به ماه‌های مارس و ژوئن می‌باشد. تغییرات فصلی متوسط شوری آب طی دوره بررسی (شکل Vb)، حاکی از افزایش آن از تابستان تا پاییز و سپس کاهش آن تا فصل بهار می‌باشد. طی سه دوره مورد بررسی نوسانات شوری آب در ماه‌های مختلف مشهود است به طوری که در دوره اول پیک شوری برخلاف دو دوره دیگر از ماه اکتبر تا ژانویه تداوم داشته است. تغییرات دما تابع شرایط فصلی بوده و بیشترین مقادیر آن بین ماه‌های ژوئن و اوت و کمترین آن بین ماه‌های ژانویه و فوریه رخ می‌دهد (شکل Vc). همان‌طور انتظار می‌رود با کاهش میزان سرعت باد، غبار نیز در منطقه کاهش داشته باشد (شکل Vd و Ve).

با توجه به شروع دوره‌های شکوفایی جلبکی در فصل پاییز و زمستان و همبستگی نسبی با تأخیر فصلی برخی متغیرها با رشد کلروفیل، شروع نمودارها فصل تابستان قرار داده شدند. همان‌طور که نمودارهای کلروفیل منطقه نشان می‌دهند، دوره نخست دارای بیشترین میزان شدت شکوفایی جلبکی بین سه دوره با بیشترین میزان غلظت میانگین حدود ۸-۹ میلی‌گرم بر مترمکعب طی ماه‌های دسامبر تا فوریه می‌باشد در حالی که پیک دوره‌های دوم و سوم در یک ماه و زیر ۶ میلی‌گرم بر مترمکعب به دست آمده‌اند. الگوی فصلی تغییرات دما طی دوره‌های رخداد شکوفایی جلبکی تقریباً مشابه با میانگین بلندمدت میانگین همسان بوده است و تفاوت محسوسی ندارند.

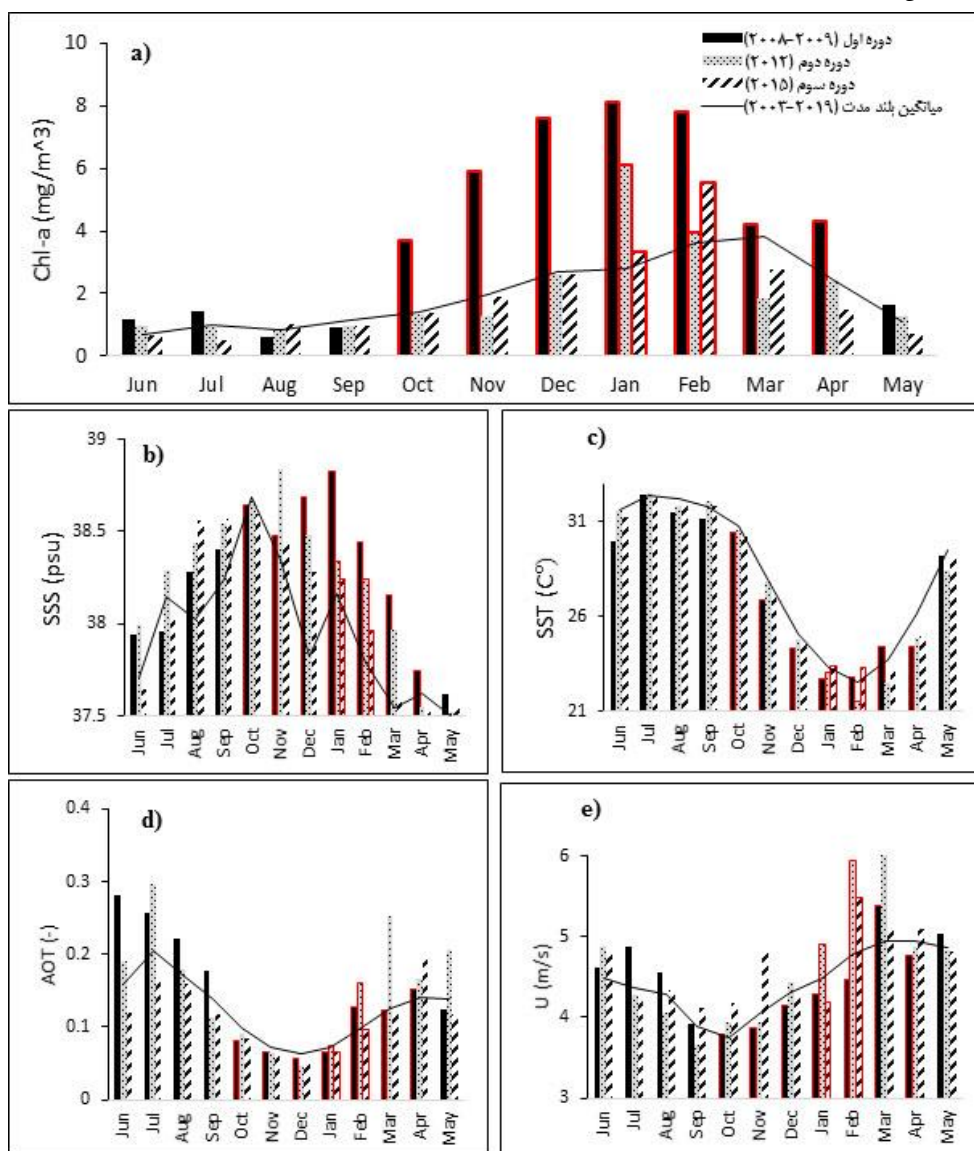
این مسئله لزوم پایش و کنترل جدی آلودگی‌های ساحلی و شرایط محیطی را طی ماه‌های اوت تا نوامبر به منظور پیشگیری از رخداد شکوفایی جلبکی و خسارات آن به صنعت آبی‌پروری و سایر فعالیت‌ها در منطقه را نشان می‌دهد. همچنین نواحی شرقی تنگه هرمز نسبت به نواحی غربی، ریسک بیشتری به لحاظ افزایش غلظت کلروفیل دارند. این مسئله می‌تواند ناشی از دما و نوسانات دمایی کمتر دریای عمان نسبت به خلیج فارس، غلظت شوری کمتر و تأمین مواد مغذی بیشتر توسط جریانات اقیانوسی و پدیده فراجوشی باشد (Zhao and Ghedira, 2014; Hamzei et al, 2012).

دمای سطح دریا و شوری در هر سه منطقه تقریباً از یک الگوی فصلی خاص تبعیت می‌کند با این تفاوت که تغییرات دمایی مناطق غربی به علت نزدیکی به خلیج فارس و عمق کمتر آن بیشتر از سایر مناطق بوده و غلظت شوری نیز از شرق به غرب حدود ۱/۵ psu افزایش می‌یابد. در دوره اول و دوم میانگین دمای مناطق مرکزی و غربی حدود یک درجه سانتی‌گراد کمتر از سال‌های دیگر می‌باشد. میزان شوری برخلاف سیکل فصلی در هر سه دوره تقریباً نه‌تنها دیرتر روند کاهشی به خود گرفته است بلکه غلظت آن نسبت به میانگین سالیانه به‌خصوص در دوره نخست افزایش داشته است. عمق اپتیکی ذرات معلق در هر سه ناحیه بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و تقریباً از سال ۲۰۰۵ میزان آن افزایش چشمگیری داشته است. سرعت باد روند نامنظمی را در سه ناحیه دنبال می‌کند. این تغییرات در نواحی غربی مشهودتر می‌باشد.

البته این موضوع نیز می‌بایست ذکر گردد که در برخی سال‌ها همچون ۲۰۰۶، غلظت کلروفیل میانگین ماهانه در مناطق مرکزی تنگه هرمز از حد آستانه تعریف شده فراتر رفته است که با توجه به مساحت و تداوم شکوفایی جلبکی ذکرشده در بخش ۱.۳ تنها این سه دوره برای مطالعه انتخاب شدند.

فیتوپلانکتون‌ها شود و از طرفی، کاهش سرعت باد باعث تشدید لایه‌بندی حرارتی شده و با کاهش غلظت اکسیژن محلول در اعماق به مرگ میر آبزیان منجر شود (Goes et al., 1992; De Sousa et al., 1996). سرعت باد در ماه‌های پیش از شکوفایی جلبکی یعنی تابستان ۲۰۰۸ در تنگه حدود ۰/۵ متر بر ثانیه بیش از میانگین بوده‌اند، اما نکته قابل توجه آن است که در زمستان ۲۰۰۹ سرعت باد در منطقه افت محسوسی نسبت میانگین دارد و تا ۰/۴ متر بر ثانیه در ماه فوریه کمتر از میانگین می‌باشد.

در ماه‌های اوج شکوفایی جلبکی یعنی دسامبر تا مارس دوره نخست شوری ۰/۵ psu بیشتر از حد میانگین بوده است. در دو دوره بعد نیز شوری بیش از حد میانگین بلند مدت بوده است به طوری که در ماه‌های منتهی به شکوفایی جلبکی یعنی نوامبر و دسامبر میزان شوری حدود ۰/۵ psu - ۰/۲۵ بیش از میانگین بلند مدت بوده‌اند و این افزایش تقریباً در زمان شکوفایی نیز پایدار مانده‌اند. فعالیت باد می‌تواند تأثیرات اکولوژیکی دوجانبه داشته باشد. از سویی افزایش آن می‌تواند منجر به پدیده فراجوشی شود که نتیجه‌ی آن باعث غنی شدن سواحل از مواد مغذی و تشدید رشد



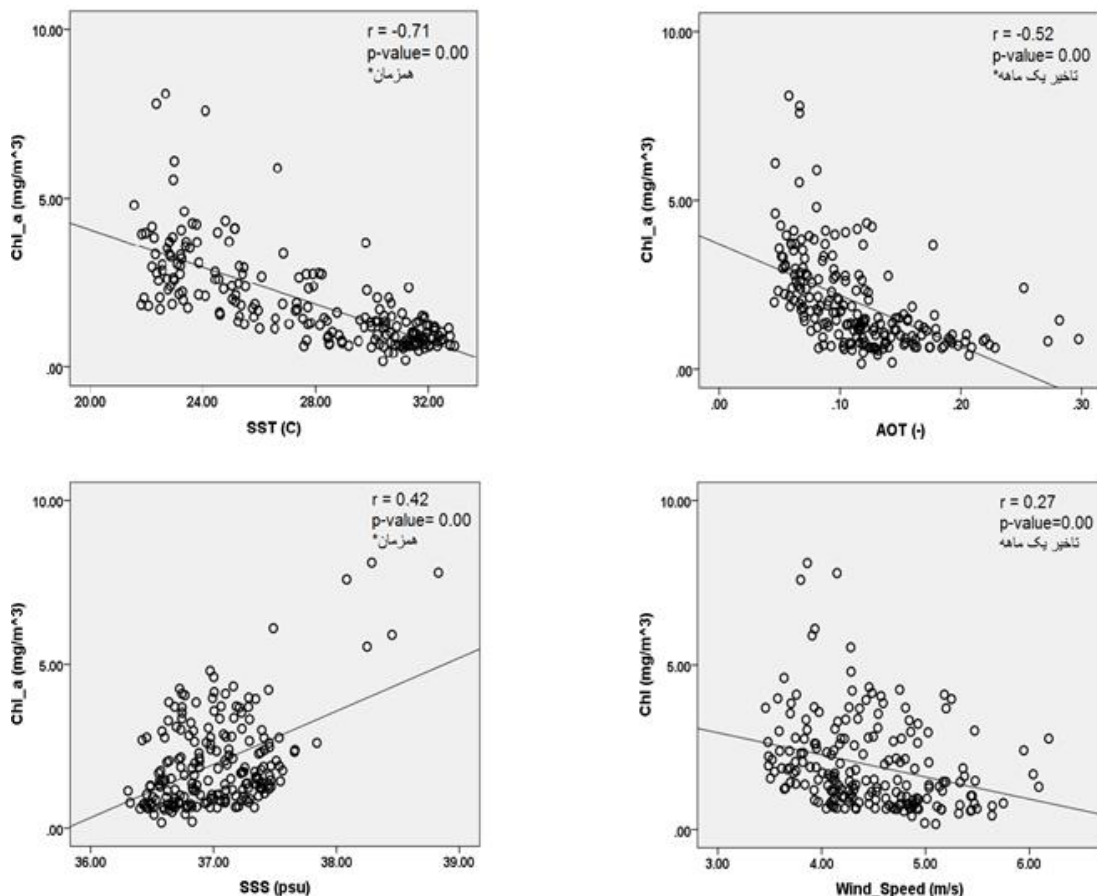
شکل ۷- نمودار مقایسه تغییرات ماهانه متغیرهای کلروفیل (a)، شوری (b)، دما (c)، ضخامت اپتیکی ذرات معلق (d) و سرعت باد (e) طی سه دوره شکوفایی جلبکی ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ با میانگین بلندمدت ۲۰۱۹-۲۰۰۳ در تنگه هرمز (رنگ قرمز مدت تداوم رخداد را نشان می‌دهد)

مقادیر متغیرهای محیطی را در منطقه طی سال های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ نشان می دهد. بر این اساس، شوری دارای همبستگی معنی دار مستقیم با کلروفیل می باشد. همچنین، غلظت کلروفیل بیشترین همبستگی معکوس را با دمای سطح آب دارد. به طور کلی با سرد شدن هوا در فصول پاییز و زمستان میزان کلروفیل در تنگه هرمز افزایش می یابد سرعت جریانهای ورودی در تنگه هرمز در بهار و تابستان بیشتر است. اما جریانهای غرب به شرق برگشتی از خلیج فارس در لایه های عمیق سرعت ثابتی در حد ۰/۲ تا ۰/۱۵ متر بر ثانیه دارند. اما در جهت شمال به جنوب در منطقه تنگه هرمز در زمستان و تابستان سرعت جریان مشابه است (Al Azhar et al., 2016). شدت بیشتر جریان ورودی به تنگه هرمز از دریای عمان در فصل تابستان در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Hunter, 1983; Reynolds, 1993).

اما در دو دوره بعد سرعت باد طی دوران پسا شکوفایی جلبکی افزایش قابل توجهی داشته که می تواند علت افول سریع تر آن نسبت به دوره اول باشد. میزان عمق اپتیکی ذرات معلق در منطقه در هر سه دوره تقریباً روندی مشابه میانگین بلندمدت را دنبال می کنند. با این تفاوت که میزان عمق اپتیکی ذرات معلق (بدون واحد) تقریباً در تابستان سالهای شکوفایی دوره اول و دوم بین ۰/۱۲-۰/۰۵ بیشتر از حالت نرمال بوده اند. این میزان با توجه به اینکه تغییرات آن طی سال تقریباً ۰/۱۵ در منطقه است، میزان قابل توجهی می باشد. همچنین طی سالهایی که شکوفایی جلبکی وجود داشته اند به خصوص در دوره اول، عمق اپتیکی ذرات معلق و غبار در ماه های پیش از آن افزایش محسوسی داشته است.

۳.۳. شناسایی متغیرهای محیطی موثر

شکل ۸ همبستگی متوسط ماهانه غلظت کلروفیل با



شکل ۸- نتایج بررسی همبستگی مقادیر متوسط ماهانه غلظت کلروفیل با متغیرهای محیطی از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ در بهترین گام زمانی در سطح معنی داری ۹۵٪ (* دارای همبستگی در بازه قوی تا بسیار قوی)

کاهش سرعت جریانات ورودی به تنگه هرمز در فصول سرد، منجر به همگنی نسبی دانسیته و دمای آب در عمق نسبت به تابستان می‌شود که لایه بندی حرارتی و دانسیته قوی تری در منطقه (به علت اختلاف دانسیته بیشتر خلیج فارس و دریای عمان) شکل می‌گیرد (Al Azhar et al., 2016). همگنی ستون آب و امکان اختلاط قایم در زمستان منجر به فراهمی مواد مغذی به صورت یکنواخت در عمق شده و منجر به رشد فیتوپلانکتون‌ها در سطح می‌شود. اما در تابستان لایه بندی دانسیته شدید منجر به پایداری ستون آب و کاهش مواد مغذی فراهم در سطح می‌شود که رشد فیتوپلانکتون‌ها را محدود می‌کند (INIOAS, 2021). همچنین با توجه به میانگین دمای هوای منطقه، دمای مناسب سطح آب برای رشد جلبک‌ها ۲۲ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد بوده و طی فصول سرد (نوامبر تا فوریه) رخ می‌دهد (Johns et al., 2003)؛ در حالی که در برخی آب‌های ساحلی دیگر دنیا که مستعد تشکیل شکوفایی جلبکی می‌باشند این بازه دمایی طی فصول بهار و تابستان اتفاق می‌افتد. از این‌رو همبستگی دما با غلظت کلروفیل برحسب شرایط آب و هوایی می‌تواند مستقیم و یا معکوس باشد. سرعت باد که عامل تشدیدکننده گرد و غبار و حرکت جریان‌های دریایی می‌باشد با کلروفیل رابطه معکوس ضعیفی دارد. به این معنا که در فصل تابستان که بیشترین میزان گرد و غبار در منطقه رخ می‌دهد، غلظت کلروفیل کمینه می‌باشد و با سردتر شدن هوا میزان گرد و غبار در منطقه کاهش می‌یابد. این الگوی فصلی برای مناطق بیابانی شامل خاورمیانه برای ذرات معلق شناخته شده است (Husar, 1997). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اظهار داشت که در منطقه مورد مطالعه میزان دمای سطح و شوری آب بیشترین تأثیر همزمان را بر غلظت کلروفیل دارند و عمق اپتیکی ذرات معلق، و سرعت باد به ترتیب بیشترین همبستگی با تأخیر یک‌ماهه را دارند.

در ادامه نتایج حاصل از همبستگی مکانی متغیرهای محیطی با کلروفیل در دو بازه زمانی رخداد شکوفایی جلبکی (۲۰۰۹-۲۰۰۸) و عدم رخداد شکوفایی جلبکی (۲۰۱۹-۲۰۱۶) در شکل ۹ ارائه شده است. در نقشه‌های همبستگی کلروفیل با شوری (شکل ۹a و ۹e)، با حرکت از سمت دریای عمان به خلیج فارس میزان همبستگی آن‌ها افزایش نسبی از حالت معکوس به مستقیم پیدا می‌کند. همچنین در دوران عدم شکوفایی جلبکی حدود ۲۴٪ از مساحت منطقه دارای همبستگی قوی بوده در حالی که این میزان طی دوران شکوفایی به ۱۱٪ کاهش می‌یابد. در نقشه همبستگی دما (شکل ۹b و ۹f)، همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشتر نواحی دارای همبستگی معکوس با کلروفیل می‌باشند و این همبستگی معکوس از ۷۱٪ طی دوران رخداد شکوفایی جلبکی به ۵۳٪ در زمانهای بدون رخداد کاهش پیدا می‌کند. عمق اپتیکی ذرات معلق تنها متغیری بود که نه تنها میزان درصد همبستگی‌ها طی دو دوره تغییر محسوسی نداشت (شکل ۹c و ۹g)، بلکه این مقادیر در بازه همبستگی ضعیف و ناچیز قرار داشتند. به‌طور میانگین، حدود ۶۲٪ مساحت تنگه هرمز طی دو زمان دارای همبستگی ضعیف و ناچیز با کلروفیل بودند و همبستگی قوی از ۸٪ به حدود ۱۷٪ در زمان شکوفایی جلبکی افزایش یافته است.

به‌طورکلی روند تغییرات در نقشه همبستگی کلروفیل با سرعت باد طی دو دوره محسوس‌تر می‌باشد. نکته قابل توجه در مورد سرعت باد (شکل ۹d و ۹h) این است که همبستگی کلروفیل با آن در تنگه هرمز طی دو دوره تغییرات زیادی دارد. حدود ۱۰٪ تنگه در حالت عادی دارای همبستگی قابل توجه مستقیم با کلروفیل داشتند که این مقادیر در حالت شکوفایی جلبکی به ۶۱٪ افزایش یافته‌اند. با توجه به نقشه‌های همبستگی کلروفیل با متغیرهای مطالعه، استنباط می‌شود که میزان همبستگی کلروفیل با شوری در بخش‌های شمالی تنگه و غربی تنگه و ساحلی بیشتر از سایر بخش‌ها در دو دوره بوده است ولی این میزان برای سرعت باد در بخش‌های مرکزی و جنوب غربی در حالت شکوفایی قابل توجه بوده است. اما برای دمای سطح آب و عمق اپتیکی ذرات معلق تغییرات تقریباً به شکل یکنواخت در منطقه چه در حالت عادی و چه در حالت شکوفایی جلبکی وجود

کاهش سرعت جریانات ورودی به تنگه هرمز در فصول سرد، منجر به همگنی نسبی دانسیته و دمای آب در عمق نسبت به تابستان می‌شود که لایه بندی حرارتی و دانسیته قوی تری در منطقه (به علت اختلاف دانسیته بیشتر خلیج فارس و دریای عمان) شکل می‌گیرد (Al Azhar et al., 2016). همگنی ستون آب و امکان اختلاط قایم در زمستان منجر به فراهمی مواد مغذی به صورت یکنواخت در عمق شده و منجر به رشد فیتوپلانکتون‌ها در سطح می‌شود. اما در تابستان لایه بندی دانسیته شدید منجر به پایداری ستون آب و کاهش مواد مغذی فراهم در سطح می‌شود که رشد فیتوپلانکتون‌ها را محدود می‌کند (INIOAS, 2021). همچنین با توجه به میانگین دمای هوای منطقه، دمای مناسب سطح آب برای رشد جلبک‌ها ۲۲ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد بوده و طی فصول سرد (نوامبر تا فوریه) رخ می‌دهد (Johns et al., 2003)؛ در حالی که در برخی آب‌های ساحلی دیگر دنیا که مستعد تشکیل شکوفایی جلبکی می‌باشند این بازه دمایی طی فصول بهار و تابستان اتفاق می‌افتد. از این‌رو همبستگی دما با غلظت کلروفیل برحسب شرایط آب و هوایی می‌تواند مستقیم و یا معکوس باشد. سرعت باد که عامل تشدیدکننده گرد و غبار و حرکت جریان‌های دریایی می‌باشد با کلروفیل رابطه معکوس ضعیفی دارد. به این معنا که در فصل تابستان که بیشترین میزان گرد و غبار در منطقه رخ می‌دهد، غلظت کلروفیل کمینه می‌باشد و با سردتر شدن هوا میزان گرد و غبار در منطقه کاهش می‌یابد. این الگوی فصلی برای مناطق بیابانی شامل خاورمیانه برای ذرات معلق شناخته شده است (Husar, 1997). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اظهار داشت که در منطقه مورد مطالعه میزان دمای سطح و شوری آب بیشترین تأثیر همزمان را بر غلظت کلروفیل دارند و عمق اپتیکی ذرات معلق، و سرعت باد به ترتیب بیشترین همبستگی با تأخیر یک‌ماهه را دارند.

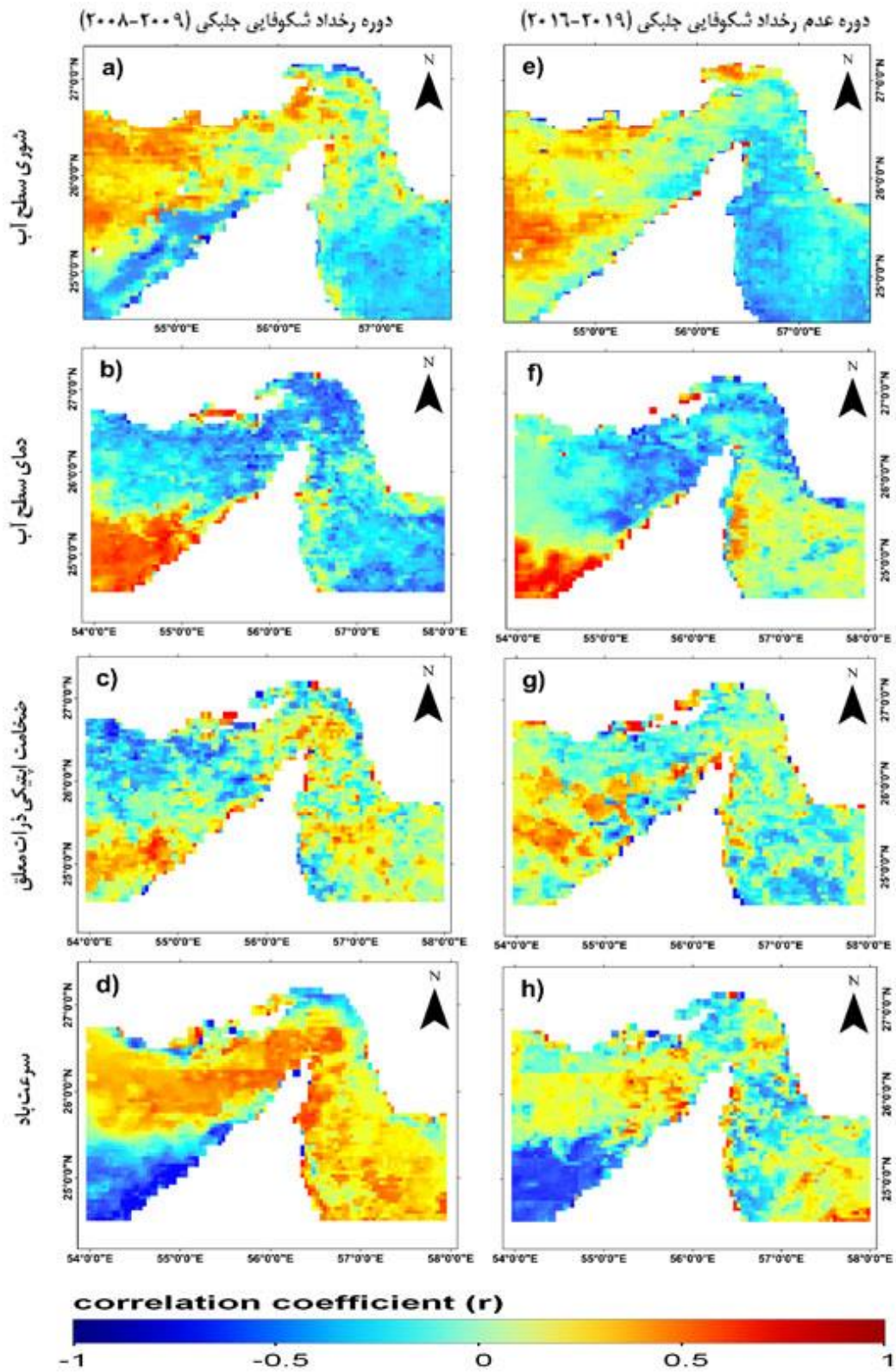
در ادامه نتایج حاصل از همبستگی مکانی متغیرهای محیطی با کلروفیل در دو بازه زمانی رخداد شکوفایی جلبکی (۲۰۰۹-۲۰۰۸) و عدم رخداد شکوفایی جلبکی (۲۰۱۹-۲۰۱۶)

با توجه به جدول ۱، باید این نکته را مدنظر قرار داد که نوع غالب جلبک در شکوفایی جلبکی دوره‌های دوم و سوم که در منطقه گزارش شده‌اند از نوع نوکتیکولا بوده است، اما گونه جلبکی دوره اول از نوع کولودینیوم بوده است که برای اولین بار در منطقه دیده شده است. گونه جلبکی کولودینیوم گونه‌ای است که قابلیت تحمل دما و شوری را در بازه‌های گسترده دارد (Morales and Hernandez, 2001). از این رو مقاومت بالای این گونه جلبکی به شرایط محیطی (دمای ۳۱ درجه سانتی‌گراد و شوری بالای ۳۸ psu)، عامل اصلی طولانی شدن دوره نخست شکوفایی جلبکی تا بیش از هفت ماه می‌باشد؛ در حالی که در دو دوره بعد این مدت تا کمتر از چند هفته تداوم داشت و از لحاظ گستره پخش نیز، شکوفایی جلبکی دوره‌های دوم و سوم آن گونه نتوانستند وارد خلیج فارس شوند. پس می‌توان بازه‌های مطرح شده دما و شوری را برای انواع گونه‌های جلبکی غالب در منطقه باز تعریف نمود، به نحوی که برای گونه جلبکی دوره نخست شرایط محیطی مناسب در بازه‌ی از شوری psu (۳۶/۴۰-۴/۲) و دمای سطح آب (۳۱/۳-۲۰/۸) درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد در حالی که این بازه‌ها برای گونه جلبکی دوره‌های دوم و سوم به شکل شوری psu (۳۶/۳۸-۸/۳) و دمای سطح آب (۲۴/۸-۲۰/۳) درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. نکته مهم دیگر در مورد جلبک کولودینیوم آن است که بیشترین گستردگی جغرافیایی را در جهان دارد و اغلب شکوفایی‌های جلبکی از این گونه می‌باشند که عمدتاً از چند روز تا ۲ ماه طول کشیده است که یکی زیان‌بارترین آن‌ها در سال ۱۹۹۵ در کره جنوبی رخ داد که حدوداً ۱،۵ ماه طول کشید و ۶۰ میلیون دلار به اقتصاد این کشور ضرر وارد کرد اما شکوفایی ثبت شده در سال ۲۰۰۸ بزرگترین و طولانی‌ترین شکوفایی از نوع گونه جلبکی کولودینیوم بوده است که تاکنون ثبت شده است (López et al., 2019).

دارند.

۴.۳. محدوده مقادیر متغیرهای محیطی موثر در هنگام رخداد شکوفایی جلبکی

گونه‌های جلبکی کولودینیوم که اصلی‌ترین گونه در شکوفایی جلبکی دوره نخست بودند شرایط گرم را نمی‌توانند زیاد تحمل کنند و دمای کم را بیشتر دوست دارند که می‌تواند دلیل همبستگی معکوس غلظت کلروفیل با دما در منطقه باشد. شرایط مشابهی در نقاط مختلف دنیا مشاهده شده است. به‌طور مثال در نواحی غربی ژاپن و کره جنوبی دما طی شکوفایی جلبکی بین ۱۰-۲۷ درجه سانتی‌گراد (Matsuoka et al., 2010) و در خلیج کالیفرنیا بین ۲۹-۳۱ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (Gárate-Lizarraga et al., 2004). بازه شوری برای گونه جلبکی کولودینیوم در غرب ژاپن بین ۳۰-۳۶ psu (Kim et al., 2004) و ۳۰-۳۴ psu در کالیفرنیا (Kudela et al., 2008) ثبت شده‌اند. اما در این مطالعه بازه شوری برای رخداد شکوفای جلبکی psu ۳۷/۵-۳۹ به دست آمده است. با استفاده از بررسی میزان شوری و دمای سطح آب در طی زمان تداوم رخداد شکوفایی جلبکی در پیکسل‌های با مقادیر کلروفیل بیش از حد آستانه، در سه ناحیه شرقی، مرکزی و غربی تنگه هرمز، حدود آستانه مطلوب دما و شوری برای هر سه دوره به دست آمده‌اند. بر این اساس، بازه مناسب به دست آمده شوری برای رشد جلبک‌ها در منطقه تقریباً بین psu ۴۰/۲-۳۶/۴ (۳۹-۳۷/۵ بازه‌ی ایده آل) می‌باشد (جدول ۴). همچنین، در هر سه دوره شکوفایی جلبکی، با شروع سرد شدن هوا در منطقه در فصل پاییز و در محدوده دمای سطح آب ۲۱ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد (۲۷-۲۲ بازه‌ی ایده آل) شکوفایی جلبکی رخ می‌دهد. بازه‌های دمایی و شوری به دست آمده با مطالعه Fatemi و همکاران (۲۰۱۲) که با استفاده از داده‌های میدانی میزان تغییرات متغیرهای فیزیکی و شیمیایی را در تنگه هرمز طی رخداد دوره اول بررسی کرده بودند، تا حد زیادی مطابقت دارد.



شكل ۹- همبستگى مكانى متغيرهاى مخيطى مورد مطالعه با كلروفيل طى دوره وقوع شكوفايى جلبكى ۲۰۰۸-۲۰۰۹ (شكلهاى a تا d) و عدم وقوع شكوفايى جلبكى ۲۰۱۶-۲۰۱۹ (شكلهاى e تا h) در تنگه هرمز

جدول ۴- نتایج حدود آستانه شوری و دمای سطح آب در شروع و خاتمه شکوفایی جلبکی در تنگه هرمز

دمای سطح آب (C)			شوری (psu)			دوره
غربی	مرکزی	شرقی	غربی	مرکزی	شرقی	
۲۹/۳	۳۰/۷	۳۱/۳	۴۰/۲	۳۹/۱	۳۷/۹	بیشینه
۲۰/۸	۲۱/۴	۲۲/۴	۳۷/۳	۳۶/۹	۳۶/۴	کمینه
۲۳/۷	۲۴/۲	۲۴/۸	۳۸/۱	۳۷/۸	۳۷/۵	بیشینه
۲۰/۳	۲۰/۹	۲۱/۶	۳۷/۴	۳۷/۱	۳۶/۸	کمینه
۲۳/۸	۲۴/۱	۲۴/۸	۳۸/۳	۳۸/۱	۳۷/۶	بیشینه
۲۱/۵	۲۲/۲	۲۳/۷	۳۶/۸	۳۶/۹	۳۶/۶	کمینه

بحث

پس از بررسی تاثیر عوامل محیطی مختلف بر تغییرات غلظت کلروفیل در محدوده مطالعاتی می توان اظهار داشت که دمای سطح آب در مقایسه با میانگین بلند مدت تغییرات محسوسی طی دوران شکوفایی جلبکی نداشته اند اما، تمامی وقایع در بازه های بدست آمده از جدول ۴ رخ داده اند، پس تغییرات دمایی را می توان به عنوان عامل محدود کننده (شرطی لازم و نه کافی) برای شکوفایی جلبکی در نظر گرفت. اما این تغییرات برای شوری محسوس بود به طوری که در طی دوران شکوفایی، شوری افزایش قابل توجهی در در منطقه داشته است که با توجه به مطالعات ذکر شده در مقدمه، تاثیر این عامل در تغییرات غلظت کلروفیل در بسیاری از نقاط دنیا ثبت شده است. نمونه برداریهای انجام شده در "طرح کلان پایش اقیانوس شناسی خلیج فارس و دریای عمان" نشان می دهد که غلظت مواد مغذی عموماً در منطقه در پاییز بیشتر از زمستان و در زمستان بیشتر از بهار است و پدیده فراجوشی در اوایل پاییز در شرق تنگه هرمز و در امتداد سواحل ایران باعث غنی شدن آبهای ساحلی از مواد مغذی به ویژه نیترات می شود که به تبع آن شکوفایی جلبکی و رشد فیتوپلانکتونها را سبب می شود. اما با افزایش دمای هوا و تبخیر در تابستان در خلیج فارس و تقویت جریانهای ورودی از دریای عمان به علت اختلاف دانسیته و تشدید لایه بندی ناشی از گرادیان شوری و پایداری ستون آب (Al azhar et al., 2016). غلظت مواد مغذی در سطح آب کاهش

می یابد (INIOAS, 2021). در واقع، تغییرات دما و شوری از آنجا که می توانند روی گردش جریان در منطقه اثر گذار باشند روی تبادل مواد مغذی و تشدید/برهم زدن لایه بندی ستون آب موثر اند. اما تغییرات شوری بیشتر تابع جریانات پادساعتگرد ورودی از دریای عمان و خروجی از خلیج فارس بر اثر گرادیان است

به منظور شناسایی عوامل موثر بر شکوفایی جلبکی ارتباط خطی متغیرهای محیطی با کلروفیل بررسی شد. در حالی که همبستگی متغیرها می تواند به صورت غیر خطی باشد. در این صورت انجام روش های انتخاب ویژگی^{۱۶} به منظور شناسایی و اولویت بندی متغیرها در مطالعات آتی پیشنهاد می شود. بررسی ها نشان داده است که طوفانهای غبار با سرعت بالای باد در ارتباط می باشند و دو عامل نشست غبار و چرخش ستون آب می توانند به شکل موازی باعث رشد فیتوپلانکتون ها شوند (Singh et al., 2008). با توجه به نتایج سه دوره و میانگین های بلندمدت هفده ساله، به طور کلی می توان تنگه هرمز را منطقه ای مناسب برای تشکیل شکوفایی جلبکی و ماندگاری آن به حساب آورد. چرا که کاهش سرعت جریان های سطحی اقیانوس هند به خلیج فارس در محدوده تنگه هرمز و ورود مواد مغذی از سواحل شمال و جنوب آن و میزان شوری و دمای مناسب تر نسبت به خلیج فارس و دریای عمان سبب می شود محیطی مناسب برای رشد جلبک ها پدید آید.

۴. جمع بندی

• بر اساس بررسی سه دوره رخداد با تداوم بیش از دو ماه در منطقه، بازه دما و شوری مطلوب برای رشد جلبک‌ها در منطقه به ترتیب ۳۹- psu و ۲۷-۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

با توجه به افزایش ریسک رخداد شکوفایی جلبکی در آب‌های جنوبی ایران به علت افزایش ورود مواد مغذی حاصل از پساب‌های شهری و صنعتی و اثر توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها در کشورهای حاشیه خلیج فارس بر افزایش شوری و ریسک شکل‌گیری شکوفایی جلبکی مضر (Ibrahim and Elfatih, 2019)، ضرورت پایش و هشدار بهنگام این پدیده بیش از پیش آشکار است. استفاده از پتانسیل داده‌های ماهواره‌ای (با قدرت تفکیک مناسب) و الگوریتم‌های معتبر همان‌طور که در این مطالعه نشان داده شد، می‌تواند در شناسایی متغیرهای محیطی موثر و مقادیر بحرانی آن‌ها به منظور توسعه مدل‌های هشدار زودهنگام منطقه‌ای موثر باشد.

در این مطالعه به منظور پایش شکوفایی جلبکی (با لحاظ غلظت کلروفیل-آ بیش از ۵ میلی‌گرم بر مترمکعب به عنوان شاخص آن) و متغیرهای محیطی اثرگذار آن شامل شوری و دمای سطح آب، از داده‌ها، محصولات ماهواره‌ای مدل‌های عددی و منطقه‌ای مختلف استفاده شد و از طریق اعتبار سنجی با داده‌های میدانی مدل‌های منتخب شناسایی شدند. پس از انجام آزمون همبستگی پیرسون (هم‌زمان و با تأخیر)، متغیرهای محیطی موثر شناسایی و اولویت‌بندی شدند که عبارت‌اند از دمای سطح دریا، شوری و عمق اپتیکی ذرات معلق. در نهایت با استفاده از مدل‌های منتخب، الگوی زمانی (برون سالی و درون سالی) و مکانی غلظت کلروفیل و متغیرهای محیطی موثر با تمرکز بر سه دوره از شکوفایی‌های جلبکی ثبت‌شده در منطقه (طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۸) با تداوم بیش از یک ماه مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- مدل‌های OC3M, OCSST, HYCOM و MERRA2 به ترتیب به عنوان مدل‌های بهینه برای پایش کلروفیل، دمای سطح آب، شوری و سرعت باد می‌توانند در منطقه تنگه هرمز مورداستفاده قرار بگیرند.
- از نظر زمانی رخداد شکوفایی جلبکی در منطقه، بین ماه‌های نوامبر تا فوریه محتمل‌تر می‌باشد.
- ناحیه مرکزی و شمالی تنگه هرمز به علت شرایط محیطی مناسب‌تر نسبت به سایر مناطق بیشتر تحت تأثیر شکوفایی جلبکی قرار گرفته است. همچنین احتمال وقوع شکوفایی جلبکی در ناحیه شرقی نسبت به ناحیه غربی تنگه هرمز بیشتر می‌باشد.

یادداشت‌ها

1. Harmful Algal Blooms
2. Red Tide
3. Upwelling
4. Aerosol
5. Fluorescence Line Height
6. Hybrid Coordinate Ocean Model
7. Aeolian Dust
8. Genetic Algorithm Combining Operation Tree
9. Multiple Channel Sea Surface Temperature
10. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
11. Conductivity, Temperature, Depth
12. Index of Agreement
13. Mean Bias Error
14. Root-Mean-Square Error
15. Anomaly
16. Feature Selection

فهرست منابع

- Acevedo-Trejos, E., Brandt, G., Merico, A., & Smith, S. L. (2013). Biogeographical patterns of phytoplankton community size structure in the oceans. *Global Ecology and Biogeography*, 22(9), 1060-1070.
- Al Azhar, M., Temimi, M., Zhao, J., & Ghedira, H. (2016). Modeling of circulation in the Arabian Gulf and the Sea of Oman: Skill assessment and seasonal thermohaline structure. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(3), 1700-1720.

- Alabbadi, B. M. M., & Chen, L. (2013, December). Applying genetic algorithm combining operation tree (GAOT) for estimating salinity of Taiwan strait using MODIS/terra. In *2013 Fourth Global Congress on Intelligent Systems* (pp. 16-20). IEEE.
- Al-Azri, A., Piontkovski, S., Al-Hashmi, K., Al-Gheilani, H., Al-Habsi, H., Al-Khusaibi, S., & Al-Azri, N. (2012). The occurrence of algal blooms in Omani coastal waters. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, *15*(sup1), 56-63.
- Anderson, D. M. 1994. Red Tides. *Scientific American*. 271: 52-58
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, *25*(4), 704-726.
- Attaran-Fariman, G., & Bolch, C. J. S. (2012). Morphology and phylogeny of scrippsiella trochoidea (dinophyceae) a potentially harmful bloom forming species isolated from the sediments of iran's south coast. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, *11*(2), 252-270.
- Blondeau-Patissier, D., Gower, J. F., Dekker, A. G., Phinn, S. R., & Brando, V. E. (2014). A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in oceanography*, *123*, 123-144.
- Brown, O. B., Minnett, P. J., Evans, R., Kearns, E., Kilpatrick, K., Kumar, A., ... & Závody, A. (1999). MODIS infrared sea surface temperature algorithm algorithm theoretical basis document version 2.0. *University of Miami*, *31*, 098-33.
- Chorus, I., & Bartram, J. (1999). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. CRC Press.
- De Sousa, S. N., Kumar, M. D., Sardessai, S., & Sarma, V. V. S. S. (1996). Seasonal variability in oxygen and nutrients in. *Current science*, *71*(11).
- Dorgham, M. M., & Mofteh, A. (1989). Environmental conditions and phytoplankton distribution in the Arabian Gulf and Gulf of Oman, September 1986. *Journal of the Marine Biological Association of India. Cochin*, *31*(1), 36-53.
- Fatemi, S. M. R., Nabavi, S. M. B., Vosoghi, G., Fallahi, M., & Mohammadi, M. (2012). The relation between environmental parameters of Hormuzgan coastline in Persian Gulf and occurrence of the first harmful algal bloom of *Cochlodinium polykrikoides* (Gymnodiniaceae). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, *11*(3), 475-489.
- Gárate-Lizárraga, I., López-Cortés, D. J., Bustillos-Guzmán, J. J., & Hernández-Sandoval, F. (2004). Blooms of *Cochlodinium polykrikoides* (Gymnodiniaceae) in the gulf of California, Mexico. *Revista de biología tropical*, *52*, 51-58.
- Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2018). Causes of harmful algal blooms. Shumway, SE; Burkholder, JM, and.
- Goes, J. I., Gomes, H., Kumar, A., Gouveia, A. D., Devassy, V. P., Parulekar, A. H., & Rao, L. V. G. (1992). Satellite and ship studies of phytoplankton along the west coast of India.
- Guerzoni, S., Chester, R., Dulac, F., Herut, B., Loÿe-Pilot, M. D., Measures, C., ... & Saydam, C. (1999). The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, *44*(1-3), 147-190.
- Gurbisz, C., & Kemp, W. M. (2014). Unexpected resurgence of a large submersed plant bed in Chesapeake Bay: Analysis of time series data. *Limnology and Oceanography*, *59*(2), 482-494.
- Hamzei, S., Bidokhti, A. A., Mortazavi, M. S., & Gheibi, A. (2012). Utilization of satellite imageries for monitoring harmful algal blooms at the Persian Gulf and Gulf of Oman. In *2012 Int Conf*

- Environ Biomed Biotechnol IPCBEE* (Vol. 41, pp. 171-174), Singapore, <http://www.ipcbee.com/vol41/035-ICEBB2012-R037.pdf>
- Hamzei, S., Sedigh Mortazavi, M., Aliakbari Bidokht, A., Gheibi, A. (2011). Investigation expansion and occurrence of red tide in the Persian Gulf and Oman Sea using analysis of MODIS sensor data. *Human & Environment*, 9(3), 39-48.
- Hill, P. R., Kumar, A., Temimi, M., & Bull, D. R. (2020). HABNet: Machine Learning, Remote Sensing-Based Detection of Harmful Algal Blooms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 3229-3239.
- Homaee, M., Dirksen, C., & Feddes, R. A. (2002). Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural water management*, 57(2), 89-109.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
- Hu, C. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2118-2129.
- Hunter, J. R. (1983). Aspects of the dynamics of the residual circulation of the Persian Gulf. In *Coastal oceanography* (pp. 31-42). Springer, Boston, MA.
- Husar, R. B., Prospero, J. M., & Stowe, L. L. (1997). Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16889-16909.
- Ibrahim, H. D., & Eltahir, E. A. (2019). Impact of brine discharge from seawater desalination plants on Persian/Arabian Gulf salinity. *Journal of Environmental Engineering*, 145(12), 04019084.
- Iranian Harmful Algal Blooms Defense Committee. (2015). *Satellite monitoring of chlorophyll a status in the surface waters of the northwest of the Oman Sea - Strait of Hormuz*. IHABDC.
- Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science. (2021). *Seasonal nitrate deficiency in the Oman Sea*. INIOAS.
- Johns, W. E., Yao, F., Olson, D. B., Josey, S. A., Grist, J. P., & Smeed, D. A. (2003). Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred heat and freshwater budgets of the Persian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12).
- Kämpf, J., & Chapman, P. (2016). *Upwelling systems of the world* (pp. 31-42). Springer International Publishing Switzerland.
- Kasich, J. R., Taylor, G. M., Governor, L., Butler, C. W., & Environmental, D. O. (2014). *Public Water System Harmful Algal Bloom Response Strategy*. Ohio Environmental Protection Agency.
- Kim, D. I., Matsuyama, Y., Nagasoe, S., Yamaguchi, M., Yoon, Y. H., Oshima, Y., ... & Honjo, T. (2004). Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). *Journal of Plankton Research*, 26(1), 61-66.
- Kudela, R. M., Ryan, J. P., Blakely, M. D., Lane, J. Q., & Peterson, T. D. (2008). Linking the physiology and ecology of *Cochlodinium* to better understand harmful algal bloom events: a comparative approach. *Harmful Algae*, 7(3), 278-292.
- Kumar, S. P., Roshin, R. P., Narvekar, J., Kumar, P. D., & Vivekanandan, E. (2010). What drives the increased phytoplankton biomass in the Arabian Sea?. *Current Science*, 101-106.

- Li, A., Stoecker, D. K., & Coats, D. W. (2000). Spatial and temporal aspects of *Gyrodinium galatheanum* in Chesapeake Bay: distribution and mixotrophy. *Journal of Plankton Research*, 22(11), 2105-2124.
- Li, J., Glibert, P. M., & Gao, Y. (2015). Temporal and spatial changes in Chesapeake Bay water quality and relationships to *Prorocentrum minimum*, *Karlodinium veneficum*, and CyanoHAB events, 1991–2008. *Harmful Algae*, 42, 1-14.
- Llebot, C., Spitz, Y. H., Solé, J., & Estrada, M. (2010). The role of inorganic nutrients and dissolved organic phosphorus in the phytoplankton dynamics of a Mediterranean bay: a modeling study. *Journal of Marine Systems*, 83(3-4), 192-209.
- Longhurst, A. (1995). Seasonal cycles of pelagic production and consumption. *Progress in oceanography*, 36(2), 77-167.
- López-Cortés, D. J., Núñez Vázquez, E. J., Dorantes-Aranda, J. J., Band-Schmidt, C. J., Hernández-Sandoval, F. E., Bustillos-Guzmán, J. J., ... & Fernández-Herrera, L. J. (2019). The state of knowledge of harmful algal blooms of *Margalefidinium polykrikoides* (aka *Cochlodinium polykrikoides*) in Latin America. *Frontiers in Marine Science*, 6, 463.
- Marcella, M. P., & Eltahir, E. A. (2008). The hydroclimatology of Kuwait: explaining the variability of rainfall at seasonal and interannual time scales. *Journal of hydrometeorology*, 9(5), 1095-1105.
- Matsuoka, K., Mizuno, A., Iwataki, M., Takano, Y., Yamatogi, T., Yoon, Y. H., & Lee, J. B. (2010). Seed populations of a harmful unarmored dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef in the East China Sea. *Harmful Algae*, 9(6), 548-556.
- Mehrfar, H., Azad, M. T., Lari, K., & Bidokhti, A. A. A. A. (2020). A numerical simulation case study of the coastal currents and upwelling in the western Persian Gulf. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 323-332.
- Moradi, M., & Kabiri, K. (2012). Red tide detection in the Strait of Hormuz (east of the Persian Gulf) using MODIS fluorescence data. *International journal of remote sensing*, 33(4), 1015-1028.
- Morales-Blake, A. and HernándezBecerril, D. U., 2001. Unusual HABs in Manzanillo Bay, Colima, México. *Harmful Algae News*, 21, 6.
- Nezlin, N. P., Polikarpov, I. G., Al-Yamani, F. Y., Rao, D. S., & Ignatov, A. M. (2010). Satellite monitoring of climatic factors regulating phytoplankton variability in the Arabian (Persian) Gulf. *Journal of Marine Systems*, 82(1-2), 47-60.
- NHMRC, T. (2005). Nutrient reference values for Australia and New Zealand. *DHA*.
- Park, S., Lee, Y., & Lee, S. R. (2013). Forecasting red tide using ensemble method. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 7(5), 145-152.
- Pease, P. P., Tchakerian, V. P., & Tindale, N. W. (1998). Aerosols over the Arabian Sea: geochemistry and source areas for aeolian desert dust. *Journal of Arid Environments*, 39(3), 477-496.
- Raine, R., McDermott, G., Silke, J., Lyons, K., Nolan, G., & Cusack, C. (2010). A simple short range model for the prediction of harmful algal events in the bays of southwestern Ireland. *Journal of Marine Systems*, 83(3-4), 150-157.
- Rao, D. S., Al-Yamani, F., & Rao, C. N. (1999). Eolian dust affects phytoplankton in the waters off Kuwait, the Arabian Gulf. *Naturwissenschaften*, 86(11), 525-529.
- Richlen, M. L., Morton, S. L., Jamali, E. A., Rajan, A., & Anderson, D. M. (2010). The catastrophic 2008–2009 red tide in the Persian Gulf region, with observations on the identification and phylogeny of the fish-killing dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *Harmful algae*, 9(2), 163-172.

- Ritzman, J., Brodbeck, A., Brostrom, S., McGrew, S., Dreyer, S., Klinger, T., & Moore, S. K. (2018). Economic and sociocultural impacts of fisheries closures in two fishing-dependent communities following the massive 2015 US West Coast harmful algal bloom. *Harmful Algae*, 80, 35-45.
- Saraji, F., Eslami, F., & Ebrahimi, M. (2010). Distribution and abundance of phytoplankton in Hormuzgan province, Hormuz Strait and the Persian Gulf waters.
- Schollaert, S. E., Yoder, J. A., O'Reilly, J. E., & Westphal, D. L. (2003). Influence of dust and sulfate aerosols on ocean color spectra and chlorophyll a concentrations derived from SeaWiFS off the US east coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C6).
- Singh, R. P., Prasad, A. K., Kayetha, V. K., & Kafatos, M. (2008). Enhancement of oceanic parameters associated with dust storms using satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C11).
- Tayebi, E., & Saradjian, M. R. (2011). Detection and monitoring of algal blooms in Persian Gulf using MODIS images. In *5th Symposium on Advances in Science and Technology, Iran*.
- Tian, R., Lin, Q., Li, D., Zhang, W., & Zhao, X. (2020). Atmospheric transport of nutrients during a harmful algal bloom event. *Regional Studies in Marine Science*, 34, 101007.
- Vazyulya, S., Khrapko, A., Kopelevich, O., Burenkov, V., Eremina, T., & Isaev, A. (2014). Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data. *Oceanologia*, 56(4), 737-756.
- Verlecar, X. N., & Desai, S. R. (2004). Phytoplankton identification manual.
- Wernet, G., Hellweg, S., Fischer, U., Papadokonstantakis, S., & Hungerbühler, K. (2008). Molecular-structure-based models of chemical inventories using neural networks. *Environmental science & technology*, 42(17), 6717-6722.
- Willmott, C. J., & Wicks, D. E. (1980). An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Physical Geography*, 1(1), 59-73.
- Wong, K. T., Lee, J. H., & Hodgkiss, I. J. (2007). A simple model for forecast of coastal algal blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(1-2), 175-196.
- Zhao, J., & Ghedira, H. (2014). Monitoring red tide with satellite imagery and numerical models: a case study in the Arabian Gulf. *Marine pollution bulletin*, 79(1-2), 305-313.
- Zhao, J., Temimi, M., & Ghedira, H. (2015). Characterization of harmful algal blooms (HABs) in the Persian Gulf and the Sea of Oman using MERIS fluorescence data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 125-136.