J. Oceanography (JOC). Volume14 (56): 47-62, winter 2023

Journal of Oceanography
Homepage: joc.inio.ac.ir

REVIEW PAPER

Decreasing Dissolved Oxygen in the Persian Gulf and the Gulf of Oman: Impacts and Strategies for Mitigation – A Comprehensive Review

Abolfazl Saleh*, Hamid Ershadifar

[1] *Ocean Science Department, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.*

[2] *Chemistry (Assistant Professor), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science , Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2023/11/18

Revised: 2024/03/10

Accepted: 2024/03/10

Keywords:

Hypoxia

Oxygen Minimum Zone

Nutrients

Warming

*Corresponding author:
✉ *saleh@inio.ac.ir*

orcid: 0000-0003-4795-8737

doi: **10.52547/joc.14.56.4**

ABSTRACT

The Persian Gulf hosts a variety of marine habitats, including mangrove forests, seagrass beds, and coral reefs, which have adapted to the challenging environmental conditions of the region to some extent. The influx of nutrients, coupled with the warming of the Persian Gulf, can result in a reduction in the dissolved oxygen concentration in the water. According to studies, hypoxic areas (oxygen concentrations less than 61 µmol/kg) in the Persian Gulf in mid-autumn can extend to more than 50,000 square kilometers. The occurrence of hypoxia in the Persian Gulf during late summer is confined to two primary areas in the western and central regions. The reconstruction of dissolved oxygen concentrations in recent decades also indicates a declining trend accompanied by an increase in the extent and duration of hypoxia in the Persian Gulf.

The Gulf of Oman and the Arabian Sea naturally and permanently host the widest and thickest OMZ in the world ocean. Depths exceeding 350 meters in the Gulf of Oman exhibit suboxic conditions (oxygen concentration less than 6 µmol/kg) during both summer and winter. The OMZ in the Arabian Sea and the Gulf of Oman has intensified over the past few decades. Oxygen levels recorded in 1960 in the core of the OMZ in the Arabian Sea and the Gulf of Oman ranged from 6 to 12 µmol/kg but have now dropped to levels below 6 µmol/kg (suboxic). This intensification of the OMZ in the Arabian Sea and the Gulf of Oman has adverse effects on the ecosystems of this region and the livelihoods of dependent populations. Marine organisms of the near-bottom layer or surface sediments are most affected by the expansion and intensification of hypoxic and suboxic conditions. Oxygen deficiency leads to a decline in the biodiversity of benthic communities, promoting resilient species such as polychaeta in surface sediments. The reduction in oxygen levels in the Arabian Sea has significantly influenced the composition of phytoplankton communities, the vertical migration of zooplankton, and myctophidae in the water column. The expansion and intensification of the OMZ, with its adverse impacts on fishing and aquaculture, also carry socio-economic implications for residents of the coastal areas of the Indian Ocean, the Gulf of Oman, and the Arabian Sea.

Management and policy strategies to halt or reduce the effects of oxygen depletion in the Persian Gulf and the Gulf of Oman can be classified into three main categories: a) ecosystem-based mitigation measures for environmental restoration and protection, b) adaptation-based measures to restore and protect marine organisms and fisheries, c) implementation of monitoring programs and analysis of the information obtained. In essence, efforts to integrate research, management, and policy actions in oceans and seas across all biological, geochemical, and physical disciplines, addressing all climate change-related issues such as warming, acidification, and oxygen reduction, and involving all academic, industrial, governmental, and regulatory sectors, constitute the most effective roadmap recommended for combating the impacts of climate change on marine resources.

NUMBER OF TABLES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF REFERENCES
0	8	67

مقاله مروری

کاهش اکسیژن محلول در خلیج‌فارس و دریای عمان، تاثیرات و راه های مقابله با آن: مروری جامع بر مطالعات انجام شده

ابوالفضل صالح*، حمید ارشادی فر

[۱] گروه اقیانوس شناسی شیمیایی و زیستی، پژوهشکده علوم اقیانوسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، ایران

[۲] گروه اقیانوس شناسی شیمیایی و زیستی، پژوهشکده علوم اقیانوسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۸
تاریخ بازبینی: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

واژگان کلیدی:
هیپوکسی
منطقه کمینه اکسیژن (OMZ)
مواد مغذی
گرمایش

*نویسنده مسئول
saleh@inio.ac.ir

orcid: 0000-0003-4795-8737

doi: 10.52547/joc.14.56.4

چکیده

خلیج‌فارس میزبان زیستگاه‌های دریایی متنوعی مانند جنگل‌های حرا، بسترهای پوشیده از علف‌های دریایی و آبسنگ‌های مرجانی است که تا حدودی خود را با شرایط محیطی سخت این منطقه سازگار کرده‌اند. افزایش ورود مواد مغذی در کنار گرم شدن خلیج‌فارس می‌تواند منجر به کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب شود. بر اساس مطالعات انجام شده، مساحت مناطق تحت تأثیر هیپوکسی (غلظت اکسیژن کمتر از ۶۱ میکرومول بر کیلوگرم) در خلیج‌فارس در اواسط پاییز می‌تواند به بیش از ۵۰۰۰۰ کیلومترمربع برسد. با این حال، وقوع پدیده هیپوکسی در خلیج‌فارس در اواخر تابستان محدود به دو منطقه اصلی در بخش های غربی و میانی است. باز سازی مقادیر غلظت اکسیژن محلول در سالهای گذشته نیز حاکی از روند کاهشی در غلظت اکسیژن محلول و افزایش وسعت و مدت هیپوکسی در خلیج‌فارس است.

در دریای عمان لایه کم اکسیژن به صورت طبیعی و دائمی وجود دارد. در اعماق بیش از ۳۵۰ متر در هردو فصل تابستان و زمستان شرایط زیراکسیژنی (غلظت اکسیژن کمتر از ۶ میکرومول بر کیلوگرم) مشاهده می شود. منطقه کمینه اکسیژن (OMZ) دریای عمان و دریای عرب در چند دهه گذشته تشدید شده است. مقادیر اکسیژن که در هسته OMZ دریای عمان و دریای عرب در سال ۱۹۶۰ در محدوده ۶ تا ۱۲ میکرومول بر کیلوگرم گزارش شد، حالا به مقادیر کمتر از ۶ میکرومول بر کیلوگرم (زیر اکسیژنی) رسیده است. موجودات دریایی که در لایه نزدیک بستر یا رسوبات نواحی دریایی حاشیه قاره زندگی می‌کنند بیشترین آسیب را از گسترش و تشدید هیپوکسی و شرایط زیر اکسیژنی متحمل می شوند. کمبود اکسیژن باعث کاهش تنوع زیستی کف زیان و غالب شدن گونه‌های مقاوم مانند کرم‌های پرتار در رسوب سطحی می‌شود. کاهش اکسیژن در دریای عمان بر ترکیب جوامع فیتوپلانکتونی، مهاجرت عمودی زئوپلانکتون و فانوس ماهیان در ستون آب تأثیر قابل توجهی داشته است. گسترش و تشدید OMZ با تأثیرات منفی بر صیادی و شیلات، آثار منفی اجتماعی و اقتصادی نیز برای ساکنین نواحی ساحلی اقیانوس هند، دریای عرب و دریای عمان به همراه دارد.

مدیریت و راهبردهای سیاست‌گذاری برای متوقف کردن یا کاستن اثرات کاهش اکسیژن در خلیج‌فارس و دریای عمان را می‌توان در سه دسته اقدام‌های مدیریتی اصلی طبقه‌بندی کرد: الف) اقدام‌های کاهشی مبتنی بر اکوسیستم برای احیا و محافظت از محیط زیست، ب) اقدام‌های مبتنی بر سازگاری برای بازسازی و حفاظت از موجودات دریایی و شیلات، ج) پیاده‌سازی و حفظ برنامه های پایش و تجزیه‌وتحلیل اطلاعات حاصل از آن. درواقع، تلاش برای یکپارچه سازی تحقیقات، مدیریت و اقدام‌های سیاستی در دریاها و اقیانوس‌ها در همه رشته‌های زیست شناسی، ژئوشیمی و فیزیک، در مورد همه مشکلات ناشی از تغییر اقلیم مانند گرمایش، اسیدی شدن و کاهش اکسیژن، و در همه بخش های دانشگاهی، صنعتی، دولتی و نظارتی، مؤثرترین نقشه راهی است که برای مبارزه با اثرات تغییر اقلیم بر منابع زیستی دریایی توصیه می‌شود.

مقدمه

اکسیژن یک عنصر ضروری برای زیستن در آب از مناطق بین گرفته تا اعماق تاریک اقیانوس است. از اواسط قرن ۲۰ میلادی تاکنون میزان ذخیره اکسیژن اقیانوس‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است (1) این تغییر در زمره مهم‌ترین تغییرات رخداده در اکوسیستم های دریایی است. اکسیژن موجود در دریا، تولید و تنوع زیستی در دریا را شکل داده و چرخه های بیوژئوشیمیایی عناصر را تنظیم می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که انقراض‌های اصلی رخ داده در تاریخ زمین با دوران اقلیمی گرم و اقیانوس‌های کم اکسیژن همراه بوده است (2) و بر اساس پیش‌بینی‌ها، چنانچه فعالیت‌های صنعتی بشر به شکل قابل توجهی کنترل و کاسته نشود، در ۱۰۰۰ سال آینده اقیانوس‌ها با کاهش چشمگیر اکسیژن مواجه خواهند شد (3). در متون علوم اقیانوس نگاری به شرایطی که غلظت اکسیژن محلول در آب کمتر از حدود ۶۱,۵ µmol/kg یا ۲ mg/l (۱,۴ ml/l) باشد هیپوکسی[۱] گفته می‌شود. عدم وجود اکسیژن در محیط آبی نیز به عنوان شرایط آنوکسی[۲] شناخته می‌شود. بر اساس برخی از منابع به شرایطی که اکسیژن محلول از محدوده ۲-۱۰ µmol/kg کمتر شود شرایط زیر اکسیژنی[۳] گفته می‌شود. در این شرایط که اکسیژن کافی برای تنفس هوازی میکروبی وجود ندارد و از طرفی هنوز شرایط برای احیای یون سولفات مهیا نشده است، گونه‌هایی جایگزین دیگری بجای اکسیژن نقش تأمین انرژی را به عهده می‌گیرند (گونه‌هایی مانند نیترات، نیتریت، یدات، یون های آهن، مولیبدن و غیره) (4). در این شرایط مرزی، محیط دریایی دچار تحولات ژئوشیمیایی قابل توجهی شده و گاز نیتروس اکسید، N_2O، با اثر گلخانه ای حدود ۳۰۰ برابر قوی تر از کربن دی اکسید تولید می‌شود. بنابراین عبور از آستانه زیراکسیژنی در محیط دریایی منجر به تحولات ژئوشیمیایی در ستون آب شده و به‌واسطه تولید گاز نیتروس اکسید اثرات قابل توجه اتمسفری و اقلیمی بر زمین خواهد داشت. تخمین زده می‌شود در طی ۵۰ سال گذشته، منتهی به ۲۰۱۰ میلادی، میزان اکسیژن اقیانوس‌ها حدود ۲٪ (معادل ۷۷ میلیارد تن) کاهش پیدا کرده باشد (5). با در نظر گرفتن حد اکسیژن محلول کمتر از ۷۰ µmol/kg در عمق ۲۰۰ متر، وسعت مناطق اقیانوسی با کمینه اکسیژن[۴] (OMZs) حدود ۴,۵ میلیون کیلومترمربع افزایش پیدا کرده است (6) و در همین زمان وسعت مناطق عاری از اکسیژن (آنوکسی) چهار برابر شده است (5).

از سال ۱۹۵۰ در بیش از ۵۰۰ منطقه دریایی در حاشیه قاره‌ها شرایط هیپوکسی گزارش شده است (شکل ۱). در کمتر از ۱۰ درصد این مناطق قبل از ۱۹۵۰ نیز شرایط هیپوکسی گزارش شده بود. به این معنی که در حدود ۴۵۰ نقطه از این مناطق یا اندازه‌گیری قبل از ۱۹۵۰ انجام نشده و یا اخیراً به مناطق شامل هیپوکسی اضافه شده اند. به نظر می رسد روند کاهش اکسیژن و افزایش تعداد مناطقی که در آن هیپوکسی گزارش می‌شود ادامه داشته باشد.

دلایل کاهش اکسیژن در محیط‌های دریایی

ورود مواد مغذی

استفاده از کودهای کشاورزی در سطح وسیع و انتقال آن از طریق رودخانه‌ها به دریا و ورود فاضلاب های صنعتی و شهری به محیط‌های دریایی منجر به افزایش قابل توجه ورودی مواد مغذی مانند نیترات و فسفات به آب‌های ساحلی شده است (1,7,8). افزایش میزان این مواد در محیط‌های دریایی ساحلی کم عمق منجر به مستعد شدن این مناطق برای شکوفایی جلبک های ریز و درشت می‌شود. تجزیه بقایای آلی حاصل از این شکوفایی ها در محیط‌های دریایی توسط موجودات میکروسکوپی همراه با مصرف قابل توجه اکسیژن است. از آنجایی که برخی از محیط‌های ساحلی، محصورند و تبادل محدودی با آبهای آزاد دارند، این کم اکسیژنی تا مدت نسبتاً زیادی در اعماق حاکم می‌ماند و معمولاً یک فصل به طول می‌انجامد. از طرفی دیگر، مواد مغذی محلول حاصل از تجزیه بقایای آلی دوباره از طریق جریان های عمودی زمستانی باعث مستعد شدن آب و شکوفایی جلبکی سال‌های بعد می‌شود و منطقه درگیر کم اکسیژنی فصلی می‌شود یا در صورت وجود، این پدیده تشدید می‌شود.

شکل ۱: مناطق دریایی ساحلی که در آن وقوع شرایط هیپوکسی (غلظت اکسیژن کمتر از ۶۱ میکرومول بر کیلوگرم) گزارش شده است. اقتباس از (1)

گرمایش

[۱] Hypoxia
[۲] Anoxia
[۳] Suboxic
[۴] Oxygen minimum zones

پدیده گرمایش جهانی که از آثار تغییر اقلیم است نیز از سویی منجر به تقویت کاهش اکسیژن در محیط‌های دریایی شده است. گرم شدن محیط‌های دریایی از طریق چند فرآیند مستقل اثر می‌کند. از یک سو، گرم شدن آب دریا انحلال پذیری گازها از جمله اکسیژن را در آب کاهش می‌دهد. از سویی دیگر با گرم شدن آب های سطحی و کاهش چگالی لایه‌های بالایی در محیط دریایی، شدت جریان ها و اختلاط های عمودی، که به‌ویژه در زمستان در اثر سرد شدن لایه‌های سطحی رخ می دهند، کاهش می یابد و در نتیجه عمق و میزان اکسیژن رسانی به لایه‌های زیرین کاهش می یابد. از طرفی دیگر، با گرم شدن آب در برخی موارد، میزان تولیدات اولیه پلانکتونی افزایش یافته که منجر به افزایش مواد آلی و تقویت هیپوکسی می‌شود (9–12).

در برخی از مناطق دریایی مانند مناطق فراجوشی و آبدره ها، هیپوکسی به طور طبیعی رخ می‌دهد. فعالیت‌های انسانی در دهه‌های اخیر به‌ویژه از ۱۹۶۰ به بعد باعث شده تا این مناطق هیپوکسی تقویت شوند و مناطق هیپوکسی و آنوکسی جدیدی در نواحی ساحلی و مصبی به سرعت توسعه یابند (13). توسعه شرایط هیپوکسی و آنوکسی در محیط‌های دریایی و به‌ویژه مناطق ساحلی منجر به تحول بوم سازگان های دریایی و تغییرات عمده در عملکرد و وضعیت آنها می‌شود (7). کاهش شدید اکسیژن در محیط باعث تغییر شرایط اکسایش-احیا در آب می‌شود که به دنبال آن مسیر واکنش‌ها و بر هم کنش‌های زیست-شیمیایی تغییر کرده، تنوع زیستی کاهش می یابد و ساختار جمعیتی و اکولوژی محیط دستخوش تحول اساسی می‌شود (14–20). گزارش های متعددی مبنی بر مرگ و میر ماهیان و جانوران دریایی ساکن بستر دریا و حتی قفس های پرورش آبزی در محیط‌های دریایی به دلیل خفگی در آب های کم اکسیژن در نقاط مختلف دنیا وجود دارد (21,22).

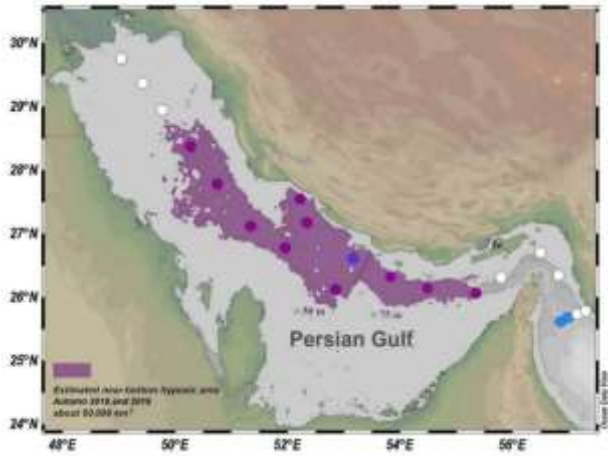
هیپوکسی در خلیج‌فارس

خلیج‌فارس میزبان زیستگاه‌های دریایی متنوعی مانند جنگل‌های حرا، بسترهای پوشیده از علف‌های دریایی و آبسنگ‌های مرجانی است که تا حدودی خود را با شرایط سخت محیطی این منطقه سازگار کرده‌اند (23). این اکوسیستم های ارزشمند از یک طرف تحت تأثیر توسعه و رشد سریع جمعیت و اقتصاد کشورهای حاشیه خلیج‌فارس و از طرفی دیگر تحت تأثیر تغییرات اقلیم منطقه، بیش از پیش از فشار فزاینده ناشی از فعالیت‌های بشری رنج می‌برند (23–25). نمونه هایی از عوامل استرس زای محیطی ناشی از فعالیت‌های بشری که می‌تواند رژیم بیوژئوشیمی منطقه را تحت تأثیر قرار داده و به صورت بالقوه تهدیدی برای اکوسیستم‌های دریایی در خلیج‌فارس و دریای عمان باشد عبارتند از افزایش بیش از حد غلظت مواد مغذی[1] و گرم شدن آب (24,26–28). افزایش ورود مواد مغذی به خلیج‌فارس عمدتاً به دو صورت انجام می‌شود. یکی از راه‌های ورود مواد مغذی به خلیج‌فارس از طریق ورودی فاضلاب‌های شهری و صنعتی و رودخانه‌هاست. از طرفی دیگر نتایج مدلسازی ها نشان می‌دهد که در اثر کاهش شدت بادهای شمال غربی زمستان، میزان ورودی آب دریای عمان به خلیج‌فارس و تأمین مواد مغذی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است (29). این دو عامل در کنار گرم شدن خلیج‌فارس می‌تواند منجر به کاهش غلظت اکسیژن محلول و بروز پدیده هیپوکسی به دلیل تشدید فعالیت تجزیه مواد آلی (تنفس باکتریایی و کفزیان)، تقویت لایه بندی و کاهش حلالیت اکسیژن در آب شود (30).

انتظار می رود آب در خلیج‌فارس با توجه به عمق کم آن (میانگین حدود ۳۵ متر) و زمان ماندگاری کوتاه (حدود ۱ تا ۲,۵ سال) همواره مملو از اکسیژن باشد (28,31). اندازه‌گیری های قبل از دهه ۱۹۸۰ نیز حاکی از این بود که آب در خلیج‌فارس همواره از میزان اکسیژن کافی برخوردار است و وقوع هیپوکسی گزارش نشده بود (31,32). اندازه گیری‌های بعد از دهه ۱۹۸۰ وجود پدیده هیپوکسی در اعماق خلیج‌فارس را نشان داد. به عنوان مثال در تابستان ۱۹۸۵ و ۱۹۸۶ اندازه‌گیری های انجام شده در آب های جنوب شرقی خلیج‌فارس وجود شرایط هیپوکسی در لایه نزدیک بستر در اعماق بیش از ۴۰ متر را نشان داد (33). در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ اندازه‌گیری هایی که در ماه دسامبر در خلیج‌فارس بر روی کشتی تحقیقاتی Umitaka-Maru انجام شد نشان داد که آب های خلیج‌فارس در ۵۰ متر بالایی به‌خوبی اکسیژن‌دار بوده در حالی که در بخش های مرکزی خلیج‌فارس در اعماق حدود ۷۰ متر شرایط هیپوکسی با غلظت کمینه اکسیژن در حدود ۴۵ µmol/kg ثبت شد (34). نتایج کاوش های محققان قطری در آب های اطراف این کشور در خلیج‌فارس مرکزی در نقاطی نزدیک به میدان گازی پارس جنوبی (گنبد شمالی قطر) در تابستان ۲۰۰۰ میلادی، نیز حاکی از برقراری شرایط هیپوکسی در بخش های عمیق خلیج‌فارس در نیمه گرم سال بود (۳۵). در آن مطالعه، کمترین مقدار ثبت شده اکسیژن محلول در آب های آزاد تا سال ۲۰۰۰ میلادی (حدود ۳۷ µmol/kg) گزارش شد. این مقدار در آب های با عمق بیش از ۵۰ متر در منطقه انحصاری اقتصادی قطر ثبت شده و منطقه تحت تأثیر هیپوکسی حدود ۷۲۲۰ کیلومترمربع تخمین زده شد. در یک مطالعه نظام مند و گسترده تر در نیمه ایرانی

[1] Eutrophication

خلیج‌فارس، داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ اکسیژن محلول در سطح و ستون آب که با استفاده از کشتی تحقیقاتی کاوشگر خلیج‌فارس در این منطقه برداشت شده بود توسط تیم تحقیقاتی صالح و همکاران منتشر شد (30) در این مطالعه تخمین زده شد که در اواسط پاییز مساحتی حدود ۵۰ هزار کیلومترمربع از بستر خلیج‌فارس در اعماق بیش از ۵۰ متر، پتانسیل رسیدن به شرایط هیپوکسی را دارد (شکل ۲). این منطقه مستعد هیپوکسی فصلی در بخش عمیق خلیج‌فارس واقع شده و عمدتاً شامل نیمه ایرانی خلیج‌فارس می‌شود. نتایج آنها نشان داد بیشترین وسعت و شدت هیپوکسی در لایه نزدیک بستر در میانه پاییز قابل انتظار است. در فصل گرم سال و با تقویت لایه بندی در ستون آب، امکان اختلاط عمودی ستون آب و تهویه اعماق و لایه‌های پایینی از بین رفته و بنابراین اکسیژن رسانی به بستر به شدت کاهش می یابد. در این شرایط با ادامه فعالیت‌های تنفسی کفزیان و شناورزیان (جانوران و میکروب ها) مصرف اکسیژن محلول و تولید کربن دی اکسید ادامه می یابد. ادامه این شرایط (مصرف اکسیژن و عدم جایگزینی با سرعت مناسب) منجر به بروز هیپوکسی و اسیدی شدن آب های نزدیک بستر می‌شود. در آن مطالعه که تنها مطالعه نظام‌مند و گسترده تا سال ۲۰۱۸ بر روی اکسیژن محلول در خلیج‌فارس بوده است کمترین غلظت اکسیژن محلول ثبت شده در آب های آزاد خلیج‌فارس (۲۵,۸ µmol/kg)، اندازه‌گیری و گزارش شد. با بررسی این مشاهدات و اندازه‌گیری ها، برخی از دانشمندان بر این باورند که در خلیج‌فارس نیز روند کاهش غلظت اکسیژن اتفاق افتاده است. بر این اساس مطالعاتی بر روی داده‌های تاریخی محدود خلیج‌فارس نیز انجام شده است که کم‌وبیش به روند کاهشی اکسیژن و بدتر شدن شرایط محیطی خلیج‌فارس اشاره دارند (28,36).

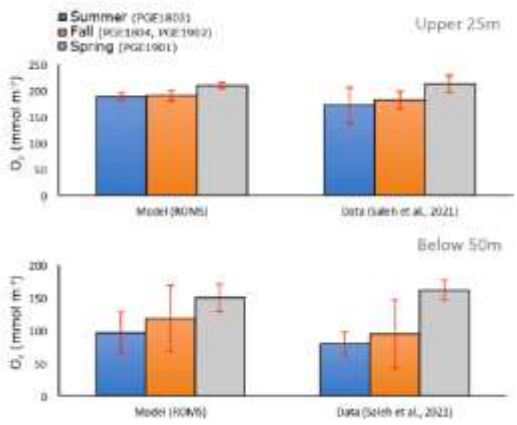


شکل ۲: منطقه مستعد هیپوکسی نزدیک بستر در پاییز سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (30)

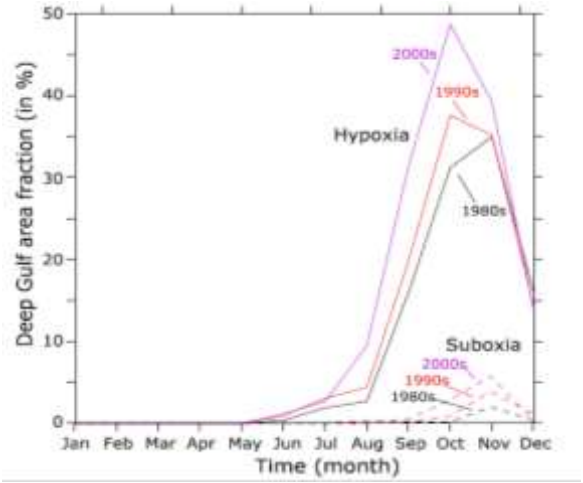
مطالعات صالح و همکاران در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ نشان دادند درجه اسیدی (pH) ثبت شده در نواحی هیپوکسی در خلیج‌فارس و تنگه هرمز معادل با مقادیری است که برای pH آب سطحی اقیانوس‌ها تحت فرآیند اسیدی شدن در سال ۲۱۰۰ با فرض وقوع سناریوی اقلیمی RCP8.5 پیش‌بینی شده است (30). بنابراین کم اکسیژنی در مناطق دریایی و از جمله خلیج‌فارس همراه با اسیدی شدن است که این دو عامل استرس زا چنانچه اثرات هم‌افزایی نیز از خود نشان دهند، آثار منفی و فراتر از انتظاری را برای زیستمندان ساکن بستر و نزدیک آن در خلیج‌فارس به همراه خواهند داشت.

اخیراً در یک مطالعه مدلسازی فیزیکی-بیوژئوشیمیایی که توسط لشکر و همکاران در کشور امارات متحده عربی انجام شده است، پویایی اکسیژن محلول در لایه‌های مختلف و فصول مختلف سال در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۰ در خلیج‌فارس باز سازی شده است (29). نتایج مدل آنها همخوانی قابل توجهی با داده‌های اندازه‌گیری میدانی سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (30) نشان می‌دهد (شکل ۳). البته تفاوت‌های قابل توجه و تأمل‌برانگیزی نیز وجود داشته که در بخش های بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت. مدل نشان می‌دهد که هیپوکسی در بخش های عمیق خلیج‌فارس در تابستان آغاز شده و در پاییز به اوج می رسد. بر اساس نتایج مدل، در سه دهه مورد بررسی خلیج‌فارس به طور متوسط در هر دهه ۱٪ از مقدار اکسیژن خود را از دست داده است و در لایه نزدیک بستر حدود ۱۰ تا ۳۰ میکرومول بر کیلوگرم از غلظت اکسیژن محلول در یک بازه ۳۰ ساله کاهش یافته است. آنها تخمین زده اند که وسعت منطقه مستعد هیپوکسی در بستر خلیج‌فارس از حدود ۲۰۰۰۰ کیلومترمربع در اوایل دهه ۸۰ میلادی به بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومترمربع در ۲۰۱۰ افزایش یافته است. از طرفی نتایج مدل نشان می‌دهد دوره زمانی هیپوکسی فصلی نیز در هر سال طولانی تر شده است (شکل ۴). به عبارتی دیگر در اواخر دوره مورد مطالعه، هیپوکسی حدود ۱ تا ۲ ماه در مقایسه با اوایل ۱۹۸۰ زودتر شروع می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مطالعات میدانی صالح و همکاران در پاییز سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ میلادی نشان می‌دهد که شرایط کم اکسیژنی خلیج‌فارس در فصل پاییز تشدید می‌شود (30) و به بیشینه خود از نظر وسعت و شدت می‌رسد. بر اساس مطالعات ایشان، با فرض اینکه در فصل پاییز هیپوکسی در همه قسمت های نیمه غربی خلیج‌فارس در اعماق بیش از ۵۰ متر و در نیمه شرقی در اعماق بیش از ۷۵ متر (تا جزایر تنب) ظاهر می‌شود، تخمین زده شده است که مناطق مستعد هیپوکسی در خلیج‌فارس می‌تواند به بیش از ۵۰۰۰۰ کیلومترمربع برسد (30). همان‌طور که قبلاً اشاره شد، محققین قطری در مطالعات خود که محدود به منطقه اقتصادی انحصاری قطر در خلیج‌فارس



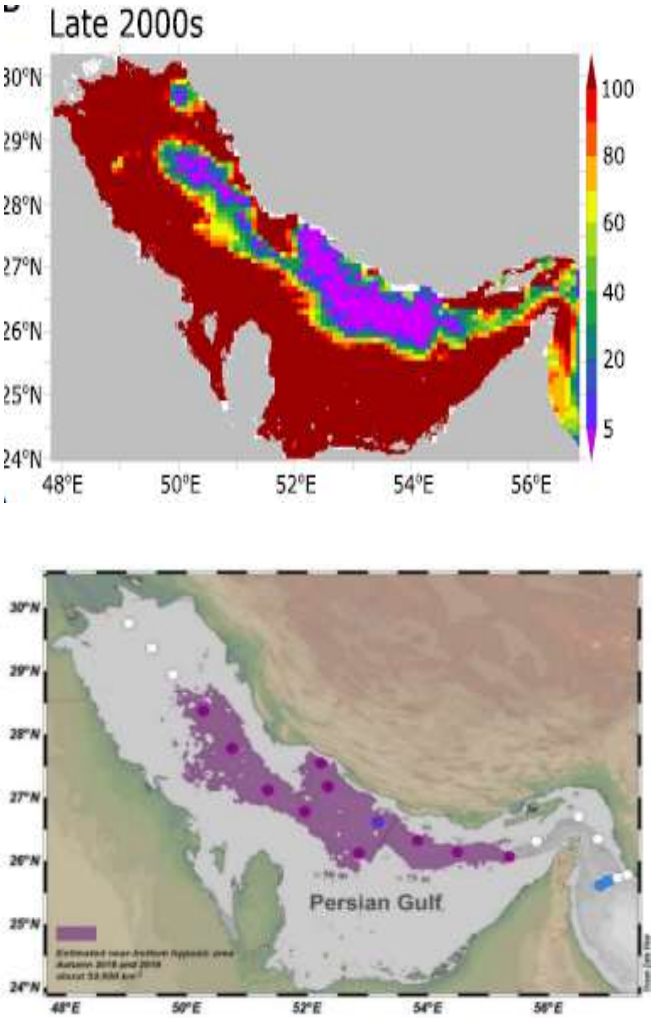
شکل ۳: ارزیابی صحت نتایج مدل (29) با داده‌های میدانی (30) در فصول مختلف و در لایه‌های بالایی و نزدیک بستر. اقتباس از (29).



شکل ۴: مساحت ناحیه هیپوکسی (کمتر از ۶۱ µmol/kg) و زیر اکسیژنی (کمتر از ۴ µmol/kg) در بخش عمیق خلیج‌فارس (اعماق بیش از ۵۰ متر) در دهه‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰. اقتباس از مرجع (29)

میانی بوده است پیش‌بینی کرده‌اند که محدوده مستعد هیپوکسی در خلیج‌فارس به بیش از ۷۰۰۰ کیلومترمربع برسد (۳۵). در نتایج مطالعه محققین قطری نکاتی وجود دارد که تخمین آنها برای تعمیم دادن به کل خلیج‌فارس را بی اعتبار می‌کند. اندازه‌گیری های آنها تنها در محدوده بسیار کوچک آب های اطراف کشور قطر انجام شده است و قابل تعمیم به کل خلیج‌فارس نیست. از طرفی دیگر، مطالعه آنها در اواخر تابستان انجام شده و هنوز بسیاری از بخش های خلیج‌فارس به آستانه هیپوکسی نرسیده اند. همان‌طور که پیش تر اشاره شد، در مطالعه لشکر و همکاران (29)، خروجی های مدل آنها در میانگین غلظت اکسیژن محلول در لایه‌های بالایی و پایینی در فصول مختلف در خلیج‌فارس شباهت غیر قابل انکاری با داده‌های اندازه‌گیری های میدانی صالح و همکاران در مقادیر و روندها نشان می‌دهد (شکل ۳). بر اساس مدل ارائه شده توسط لشکر و همکاران مساحت منطقه مستعد هیپوکسی در پاییز خلیج‌فارس از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ از حدود ۲۰۰۰۰ به حدود ۳۰۰۰۰ کیلومترمربع رسیده است. اگرچه این تخمین با مقدار ۵۰۰۰۰ کیلومترمربع که توسط صالح و همکاران تخمین زده شده است، تفاوت دارد با این حال همچنان مساحت قابل توجهی از خلیج‌فارس را شامل می‌شود و از مقداری که محققین قطری تخمین زده اند بسیار بیشتر است. تفاوت موجود میان تخمین مدل و تخمین میدانی می‌تواند به دلیل محدودیت های مدل لشکر و همکاران یا عدم صادق بودن فرضیات صالح و همکاران در همه نقاط خلیج‌فارس باشد. مدل استفاده شده توسط لشکر و همکاران در محاسبه شدت لایه بندی با خطای منفی همراه بوده (29) که این محدودیت به همراه عدم استفاده از داده‌های عمق با رزولوشن ایده ال، که در بسیاری از موارد منجر به در نظر گرفتن اعماقی کمتر از اعماق واقعی در محاسبات مدل می‌شود، می توانند از دلایل اصلی وجود این تفاوت باشند. از طرفی دیگر باید توجه داشت که نتایج بازسازی شده مدل لشکر و همکاران در دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ بوده است و اندازه‌گیری های میدانی صالح و همکاران حدود یک دهه بعد انجام شده است. مناطق مستعد هیپوکسی در خلیج‌فارس در مطالعه لشکر و همکاران و مطالعه صالح و همکاران در سال‌های اخیر در شکل ۵ نشان داده شده است. در اندازه‌گیری های میدانی که از سال ۲۰۱۸ در خلیج‌فارس انجام شده است مشخص شده است که وقوع پدیده هیپوکسی در خلیج‌فارس در اواخر تابستان محدود به دو منطقه اصلی در بخش غربی و میانی است. بخش غربی خلیج‌فارس در آب های دور از ساحل شهر بوشهر، جایی که عمق آب به بیش از ۵۰ متر می رسد، جزء اولین مناطقی است که در تابستان به آستانه هیپوکسی می رسد و این شرایط تا شروع سرمای زمستانی دی ماه ادامه پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد کفزیان این منطقه حدود ۴ ماه از سال را در شرایط هیپوکسی سپری می‌کنند (شهریور تا دی). منطقه دیگری در خلیج‌فارس که بر اساس داده‌های میدانی جمع آوری شده در سال‌های اخیر مستعد شرایط هیپوکسی شناخته شده است، بخش عمیق نزدیک به ساحل در محدوده خلیج نایبند تا بندر کنگان است. این منطقه از خلیج‌فارس در منتهی الیه شمال غربی بخش میانی خلیج‌فارس قرار دارد و به‌وسیله دماغه مرکزی، از بخش غربی خلیج‌فارس جدا می‌شود. ویژگی های توپوگرافی بستر دریا در این منطقه باعث جدا شدن آبهای عمیق این منطقه از آب های عمیق بخش جنوبی و غربی خلیج‌فارس می‌شود (۳۰). بر اساس مشاهدات میدانی به نظر می‌رسد تشکیل آب های با چگالی بالا (با شوری بیش از ۴۰) در تابستان در سواحل جنوبی خلیج‌فارس، و سپس پایین رفتن و حرکت در بستر خلیج‌فارس به سمت قسمت‌های عمیق میانه

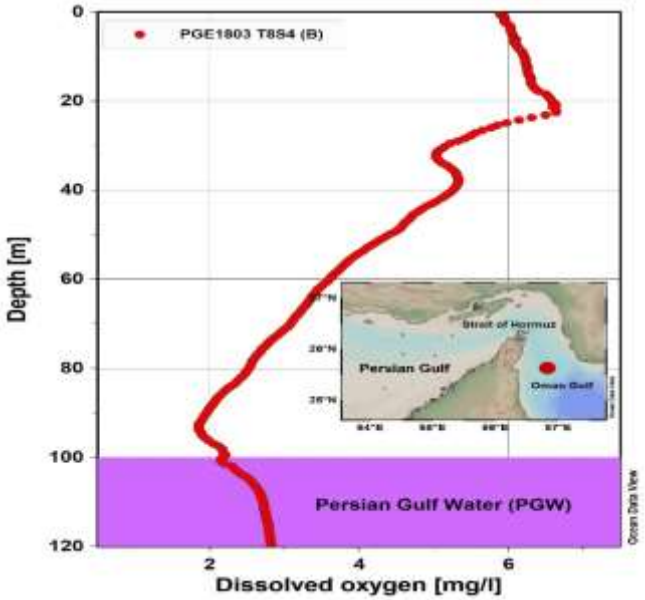
خلیج‌فارس، یکی از عوامل اصلی اکسیژن رسانی به بستر خلیج‌فارس در تابستان و دلیل به تعویق افتادن ظهور هیپوکسی در نیمه گرم سال در این مناطق باشد. مناطقی از بستر خلیج‌فارس در اعماق بیش از ۵۰ متر که در تابستان از این جریان نزدیک بستر بی بهره باشند احتمالاً زودتر از بقیه مناطق در معرض هیپوکسی قرار می گیرند. بخش های عمیق خلیج‌فارس غربی و منطقه عمیق نزدیک به ساحل از عسلویه تا بندر کنگان در خلیج‌فارس حائز این شرایط هستند و اندازه‌گیری ها نیز نشان می‌دهد که این دو منطقه اولین مکان‌هایی هستند که به مرز هیپوکسی می‌رسند.



شکل ۵: مناطق مستعد هیپوکسی پاییزی در خلیج‌فارس. سمت راست نتایج خروجی مدل برای اواخر دهه ۲۰۰۰ (29) و سمت چپ تخمین حاصل از اندازه‌گیری های میدانی در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (30)

مطالعات نشان داده است که کاهش غلظت اکسیژن در بخش های عمیق دریا همراه با افزایش غلظت مواد مغذی مانند نیترات و فسفات و نیز کربن معدنی محلول است. در خلیج‌فارس نیز مشاهدات انجام شده تا کنون حاکی از تجمع فسفات و نیترات در مناطق هیپوکسی است (30,35). برخی از منابع با استناد به تجمع فسفات و نیترات در لایه نزدیک بستر، فعالیت‌های تنفسی در رسوبات بستر را منشأ مصرف اکسیژن و تولید مواد مغذی و کربن معدنی (کربن دی اکسید) می‌دانند (29). بر اساس مطالعات ما در خلیج‌فارس و تنگه هرمز در سال‌های اخیر می‌توان به شواهدی اشاره کرد که نشان می‌دهد تنفس و تجزیه مواد آلی در ستون آب خلیج‌فارس نیز از اهمیت زیادی در کاهش غلظت اکسیژن محلول و اسیدی شدن محیط برخوردار است. نتایج مطالعات ما نشان می‌دهد در مناطقی از خلیج‌فارس که عمق آب به اندازه کافی زیاد است و لایه نزدیک بستر به دلیل تغذیه از جریان های چگال اکسیژن‌دار به شکل ۵: مناطق مستعد هیپوکسی پاییزی در خلیج‌فارس. سمت راست نتایج خروجی مدل برای اواخر دهه ۲۰۰۰ (29) و سمت چپ تخمین حاصل از اندازه‌گیری های میدانی در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (30)

آستانه هیپوکسی نرسیده است، در برخی موارد لایه‌های میانی درگیر شرایط هیپوکسی می‌شوند به طوری که این لایه هیپوکسی در میان لایه‌های اکسیژن‌دار بالایی و پایینی قرار می گیرد. این شرایط در خلیج‌فارس غربی در تابستان در ایستگاه‌هایی در ترانسکت روبروی رودخانه مند در آب های استان بوشهر و نیز در فصل تابستان و زمستان در شرق تنگه هرمز روبروی کوه مبارک دیده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶: لایه میانی در شرایط هیپوکسی (۸۹-۹۶ متر) محصور در میان لایه‌های اکسیژن‌دار بالایی و پایینی، شرق تنگه هرمز، تابستان ۲۰۱۸ میلادی، گشت تحقیقاتی PGE1803. عبور دائمی جریان اکسیژن‌دار PGW در لایه نزدیک بستر بخش میانی تنگه هرمز مانع بروز شرایط هیپوکسی در این ناحیه می‌شود.

بر اساس مطالعات انجام شده، به نظر می رسد هر سال در وسعت قابل توجهی از خلیج‌فارس و تنگه هرمز به‌صورت فصلی کاهش شدید اکسیژن محلول در مناطق با عمق بیش از ۵۰ متر رخ می‌دهد.

بازسازی مقادیر غلظت اکسیژن محلول در دهه‌های گذشته نیز حاکی از روند کاهشی در غلظت اکسیژن محلول، افزایش وسعت مناطق هیپوکسی و افزایش مدت دوره‌های فصلی هیپوکسی در خلیج‌فارس است (29). در برخی از گزارش‌های منتشرشده، بروز هیپوکسی در فصل تابستان را به افزایش غلظت مواد مغذی تحت تأثیر آب ورودی به خلیج‌فارس از دریای عمان در فصل تابستان نسبت می‌دهند. با این استدلال که فراجوشی ناشی از مانسون جنوب غربی در دریای عرب منجر به غنی شدن آب های سطحی دریای عرب و عمان نسبت به مواد مغذی شده و با ورود به خلیج‌فارس و تشدید تولید مواد آلی در اثر شکوفایی فیتوپلانکتونی، در نهایت فعالیت‌های تنفسی تشدید شده و افت اکسیژن رخ می‌دهد (35). اما این استدلال بر اساس شرایط واقعی هیدوردینامیکی و بیوژئوشیمیایی حاکم بر منطقه نمی تواند درست باشد. از طرفی اندازه‌گیری های میدانی نشان می‌دهد در زمان مانسون جنوب غربی (فصل تابستان) غلظت مواد مغذی در لایه بالایی دریای عمان در مقدار کمینه فصلی قرار می گیرد. به این دلیل که آب های ناشی از فراجوشی در سواحل شرقی عمان و یمن در زمان مانسون جنوب غربی به ندرت به دریای عمان راه پیدا می کنند (37) و از طرفی دمای بالای لایه سطحی دریای عمان نیز ستون آب را در شرایط لایه بندی شدید قرار داده و عمق اختلاط را به حدود ۵۰ تا ۶۰ متر می رساند. بنابراین در فصل تابستان، آب های سطحی دریای عمان که از طریق تنگه هرمز به خلیج‌فارس وارد می‌شوند تأثیر چندانی بر غلظت مواد مغذی خلیج‌فارس نخواهند داشت. در مقابل، جریان آب ورودی زمستان به خلیج‌فارس می‌تواند نقش بسیار بیشتری در ورود مواد مغذی محلول (نیترات و فسفات) به خلیج‌فارس داشته باشد. در فصل زمستان و با سرد شدن لایه سطحی، عمق اختلاط در ستون آب به بیش از ۱۰۰ متر افزایش می یابد. مقادیر قابل توجهی از مواد مغذی زیر ترموکلاین تابستانه (در اعماق حدود ۴۰ تا ۱۰۰ متر) به لایه بالایی منتقل شده و در اثر جریان های ورودی به خلیج‌فارس وارد می‌شوند (38,39). نتایج مدلسازی خلیج‌فارس نشان می‌دهد در دهه‌های گذشته شدت بادهای شمال زمستانه کاهش یافته و در نتیجه میزان آب ورودی به خلیج‌فارس در زمستان روند افزایشی داشته است (29). با توجه به اینکه آب سطحی دریای عمان در فصل زمستان غنی از مواد مغذی است، انتظار می رود شار نیترات و فسفات از دریای عمان به خلیج‌فارس در اثر تغییرات اقلیمی منطقه ای افزایش یافته باشد. احتمالا، این افزایش ناشی از تغییرات اقلیم منطقه ای در کنار افزایش ناشی از ورود آلودگی ها از خشکی (فاضلاب شهری، صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی)، میزان ورودی مواد مغذی به خلیج‌فارس را در دهه‌های گذشته افزایش داده و به تقویت فرایند تنفس در لایه نزدیک بستر خلیج‌فارس در همه طول سال منجر شده است. با این توصیف، توجیه نتایج به دست آمده توسط لشکر و همکاران در مورد روند تشدید هیپوکسی در خلیج‌فارس ساده تر و باورپذیرتر می‌شود. کاهش شدت بادهای شمال تابستانه (27,40) نیز به شکل دیگری در کاهش غلظت اکسیژن محلول در خلیج‌فارس تأثیرگذار بوده است. کاهش شدت و تعداد وزش باد شمال تابستانه، کاهش خنک شدن تبخیری آب را به دنبال داشته است. افزایش دمای سطحی از طریق کاهش حلالیت اکسیژن و نیز تقویت لایه بندی و ممانعت از تأمین اکسیژن نزدیک بستر، شرایط را برای کاهش بیشتر اکسیژن مهیا می‌کند.

یکی از سؤالاتی که در مورد کاهش اکسیژن محلول در خلیج‌فارس باید مورد بحث قرار بگیرد این است که آیا در لایه نزدیک بستر آب های آزاد خلیج‌فارس و تنگه هرمز در طول سال شرایط زیر اکسیژنی[1] به وجود می‌آید؟ شرایط زیر اکسیژنی همان طور که در بخش های پیشین تعریف شد، به شرایطی گفته می‌شود که غلظت اکسیژن محلول بسیار کم شده (به طور متوسط کمتر از ۴ میکرومول بر کیلوگرم) و گونه های دیگری مانند نیترات و نیتریت بجای اکسیژن در فرایند تنفس باکتریایی مصرف می‌شوند. در پژوهشی که توسط لشکر و همکاران بر روی مدل سازی بیوژئوشیمیایی خلیج‌فارس انجام شد، تخمین زده شده که مساحت قابل توجهی از لایه نزدیک بستر خلیج‌فارس مستعد شرایط زیر اکسیژنی بوده و این مساحت از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ دو برابر افزایش یافته است و به مقدار حدود ۵۵۰۰ کیلومترمربع رسیده است (29). بر اساس مطالعات آنها وضعیت زیر اکسیژنی در لایه نزدیک بستر از ماه سپتامبر آغاز شده و در ماه نوامبر به بیشینه وسعت و شدت خود می رسد. بر اساس اندازه‌گیری های انجام شده در بخش های عمیق خلیج‌فارس توسط تیم تحقیقاتی صالح و همکاران در فصول مختلف سال (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲) به نظر می رسد اعتقاد به ایجاد شرایط زیر اکسیژنی در آب های آزاد خلیج‌فارس بدبینانه به نظر می‌رسد. کمترین مقدار اکسیژن ثبت شده در لایه نزدیک بستر خلیج‌فارس در ماه نوامبر ۲۰۱۸ برابر با ۲۵,۸ µmol/kg به دست آمده

است (30) که این مقدار فاصله زیادی از آستانه زیراکسیژنی (۴ µmol/kg) دارد. به نظر می رسد ورودی ها و ویژگی های مدل استفاده شده توسط لشکر و همکاران هنوز به شرایط ایده ال برای پیش‌بینی و بازسازی بیوژئوشیمی خلیج‌فارس نرسیده باشد. به هر حال، نتایج مطالعات میدانی نشان می‌دهد که احتمال ایجاد شرایط زیر اکسیژنی بخش های عمیق خلیج‌فارس در مناطق دور از ساحل

[1] Suboxic

بسیار ضعیف است. بنابراین وقوع دنیتریفیکاسیون در ستون آب در خلیج‌فارس دور از انتظار است، اگرچه برخی منابع از دو برابر شدن آن در سه دهه گذشته سخن گفته شده است. (29).

اثرات کاهش اکسیژن در خلیج‌فارس

توسعه و تشدید هیپوکسی در خلیج‌فارس این پتانسیل را دارد که بیوژئوشیمی خلیج‌فارس و اکوسیستم‌های دریایی آن را به طرق مختلفی تغییر دهد (29). هیپوکسی می‌تواند باعث مرگ و میر گسترده ماهیان شود و تنوع زیستی را کاهش دهد (41). موجوداتی که از هیپوکسی نجات می یابند نیز در اثر استرس وارد شده، دچار اشکالاتی در رشد، فیزیولوژی و تولید مثل می‌شوند. از طرفی با کاهش مساحت زیستگاه هایشان در اثر گسترش هیپوکسی، در مقابل شکارچیان طبیعی و صیادان آسیب پذیر تر می‌شوند (42). هیپوکسی می‌تواند منجر به تغییر در توزیع پراکنش ماهیان به خاطر مهاجرت اجباری شود (43,44). ساختار شبکه غذایی با غلبه گونه‌های مقاوم به هیپوکسی (مانند میکروبها) و به ضرر جانوران بزرگتر مانند ماهیان، تغییر می‌کند (42,45). ترکیب جوامع مزوزوپلانکتون تحت تأثیر نوسانات غلظت اکسیژن محلول تغییر می‌کند (46) به‌طوری که حضور برخی از گونه های حساس به غلظت اکسیژن در مناطقی که تحت تأثیر شرایط هیپوکسی دائمی هستند، مشاهده نمی شود. ساختار و ترکیب جوامع در آبسنگ‌های مرجانی نیز در شرایط هیپوکسی دستخوش تغییر می‌شود (47)، در واقع، تشکیل متناوب شرایط هیپوکسی می‌تواند منجر به مرگ و میر انبوه موجودات زنده ساکن آبسنگ ها شود و در موارد غیر کشنده، با طیفی از عوارض منفی مانند: (الف) تغییر واکنش‌های رفتاری و فیزیولوژیکی، (ب) کاهش نرخ رشد و/یا (ج) کاهش ظرفیت تولیدمثل همراه باشد، و این آثار منفی، آسیب پذیری این زیست بوم های ارزشمند خلیج‌فارس را در مقابل گرمایش و تغییرات اقلیم افزایش می‌دهد (de Verneil et al., 2021). وقوع شرایط هیپوکسی، یکی از دلایل مرگ و میر ماهیان، خیارهای دریایی و نرم تنان (مانند صدف مروارید ساز) در بخش های شمال غربی خلیج‌فارس برشمرده شده است (21)

آثار کاهش کیفیت آب خلیج‌فارس بر میزان اکسیژن دریای عمان

کاهش کیفیت آب خلیج‌فارس (PGW) علاوه بر اثرات سوئی که بر اکوسیستم های ارزشمند آن و متعاقباً صیادی و شیلات در این خلیج می‌گذارد (23,48)، می‌تواند به سه روش مختلف اثرات قابل توجهی را در دریای عمان و حتی دریای عرب بر جای بگذارد (49). ۱) وقتی آب شور خلیج‌فارس با چگالی بالا از تنگه هرمز به دریای عمان وارد می‌شود، در اعماق ۲۰۰ تا ۳۵۰ متر دریای عمان قرار می گیرد و از طریق جریان های حاکم در دریای عمان به دریای عرب منتقل می‌شود. به همین دلیل PGW نقش تعیین کننده ای را در تهویه و اکسیژن رسانی به سطح فوقانی لایه کمینه اکسیژن (OMZ) در دریای عمان و دریای عرب به عهده دارد (50). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که گرم شدن خلیج‌فارس منجر به گرم شدن PGW و کاهش چگالی آن می‌شود. این کاهش چگالی منجر به کاهش عمق جریان PGW در دریای عمان می‌شود و در نتیجه اکسیژن رسانی به بخش فوقانی OMZ تضعیف و OMZ تقویت می‌شود (50). ۲) افزایش مقدار کربن آلی کل (TOC) در جریان PGW نیز می‌تواند منجر به انتقال آن به OMZ در دریای عمان شده و مقدار مواد تجزیه‌پذیر و مصرف کننده اکسیژن را افزایش دهد و بنابراین ظرفیت بیشتری را برای مصرف اکسیژن و تشدید OMZ در دریای عمان و دریای عرب فراهم می‌کند. افزایش TOC در خلیج‌فارس تحت تأثیر افزایش آلودگی های با منشأ انسانی و افزایش تولیدات اولیه (شکوفایی های پلانکتونی) ناشی از رشد غلظت فسفات و نیترات در دهه‌های گذشته محتمل است (28,51). ۳) کاهش غلظت اکسیژن در لایه نزدیک بستر خلیج‌فارس به طور مستقیم منجر به کاهش مقدار اکسیژن محلول منتقل‌شده از طریق PGW به OMZ دریای عمان می‌شود. کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب خلیج‌فارس در چند دهه گذشته از طریق مدلسازی (29) و نتایج اندازه‌گیری های میدانی (30,34,35) نشان داده شده است.

کاهش اکسیژن و اثرات آن در دریای عمان

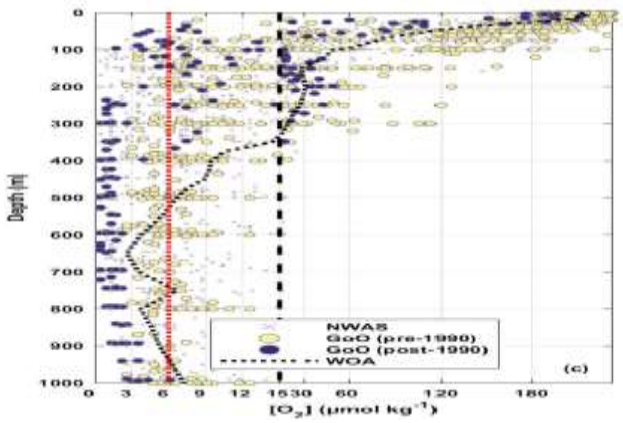
ضخیم‌ترین منطقه کمینه اکسیژن اقیانوسی زمین در دریای عرب و دریای عمان قرار گرفته است (52). غلظت اکسیژن محلول در این منطقه اقیانوسی در لایه حدود ۱۵۰ متر تا ۱۲۵۰ متر در محدوده زیر اکسیژنی قرار دارد. این وضعیت اکسیژن محلول در دریای عمان و دریای عرب ناشی از فعالیت تنفسی شدید در غیاب تهویه مناسب است. اگرچه از نظر مساحت، کمتر از ۲ درصد اقیانوس‌های زمین را شامل می‌شود، با این حال حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از حذف نیتروژن از ستون آب توسط فرایند دنیتریفیکاسیون[1] در همه اقیانوس‌ها در این منطقه رخ می‌دهد (52–54). طی فرآیند دنیتریفیکاسیون نیتروژن در فرم هایی مطلوب فتوسنتز مانند نیترات و نیتریت مصرف شده و بجای آن گازهایی مانند نیتروس اکسید (N_2O) که خواص بسیار قوی گلخانه ای از خود نشان می‌دهد تولید می‌شود (53). آب های خارج شده از خلیج‌فارس با آنومالی چگالی پتانسیل حدود ۲۶٫۴ kg/m^3 در لایه

[1] Denitrification

حدود ۱۵۰ تا ۳۵۰ متر در دریای عمان به سمت دریای عرب منتقل شده و به بخش های فوقانی OMZ در این منطقه اکسیژن رسانی می کنند (Morrison et al., 1999)

مطالعات اخیر نشان داده است که OMZ در دریای عرب و به‌ویژه دریای عمان در چند دهه اخیر با کاهش شدیدتر اکسیژن همراه بوده است (شکل ۷). به عنوان مثال ایتو و همکاران نشان داده‌اند که در فاصله سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ OMZ در دریای عرب تشدید شده است (۵۵). در مطالعه دیگری کاهش غلظت اکسیژن و بالاتر آمدن مرز لایه هیپوکسی در دریای عمان نشان داده شده است (56). در یک تحقیق گومس و همکاران کاهش غلظت اکسیژن محلول در دریای عرب و دریای عمان در دهه‌های اخیر را هم‌زمان با تغییر گونه غالب فیتوپلانکتونی از دیاتوم به داینوفلاژله بررسی و سعی کرده‌اند بین این دو موضوع به نحوی ارتباط معنی دار پیدا کنند (15). در یکی از جدیدترین مطالعات میدانی انجام شده در دریای عمان کووست و همکاران بر اساس مقایسه داده‌های حسگرهای گلایدر در دریای عمان (در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) با داده‌های تاریخی موجود، نشان می دهند که در ۳ دهه گذشته OMZ در دریای عمان تشدید شده است (49). تشدید OMZ در دریای عمان و دریای عرب نه تنها باعث تغییرات اکوسیستم و انقباض زیستگاه‌های مطلوب می‌شود، بلکه با تشدید دنیتریفیکاسیون باعث تغییرات عمده در بودجه نیتروژن و کربن در محیط‌های دریایی می‌شود. این در حالی است که کاهش اکسیژن رسانی به لایه فوقانی OMZ در دریای عمان بسیار محتمل است. در مطالعه جدیدی که توسط لشکر و همکاران انجام شده است، با استفاده از مدل ها نشان داده می‌شود که گرم شدن خلیج‌فارس و کاهش چگالی آب خروجی از خلیج‌فارس باعث می‌شود که این جریان به لایه‌های بالاتری منتقل شده و اکسیژن رسانی به OMZ در دریای عمان را به شدت کاهش دهد (50). اکسیژن رسانی PGW به منطقه OMZ در دریای عمان یک الگوی فصلی نیز نشان می‌دهد. میزان آب های اکسیژن‌دار (بیشتر از ۶ µmol/kg) در عمق حدود ۲۰۰ متر دریای عمان در فصل تابستان در مقایسه با زمستان حدود ۲ تا ۴ برابر بیشتر است (49) که ناشی از حجم بیشتر PGW در نیمه گرم سال است. بنابراین تغییرات کمی و کیفی فصلی و بلندمدت PGW می‌تواند تأثیرات مستقیم و قابل توجهی را در میزان اکسیژن رسانی به OMZ در دریای عمان داشته باشد. تغییرات OMZ تأثیر قابل توجهی بر تنوع گونه ای، شیلات و صیادی در این منطقه خواهد داشت.

تغییرات فصلی و چند سالانه غلظت اکسیژن محلول و عمق لایه هیپوکسی در دریای عمان به دلیل تغییرات چگالی لایه سطحی (در اثر سرد و گرم شدن) و تغییر حجم جریان PGW می‌تواند بر صیادی در دریای عمان تأثیر بگذارد. در دریای عمان توده عظیمی از زئوپلانکتون که به شرایط اکسیژن کم سازگار شده است وجود دارد مانند *Euphausia diomedeae* و فانوس ماهیان. بسیاری از موجودات در ستون آب دریای عمان و شمال غرب دریای عرب با شرایط فقر اکسیژن مقاوم شده و سازگاری یافته اند. در شرایطی که در دریای عمان و شمال غرب دریای عرب وجود دارد، به‌ویژه در فصل تابستان که زیستگاه مناسب موجودات بالای هرم غذایی منقبض و محدود به چند ده متر بالای ستون آب می‌شود، جریان PGW در منطقه زیر خط هیپوکسی زیستگاه و پناهگاهی را برای موجودات کوچکتر و سازگار با شرایط کم اکسیژنی (با فعالیت متابولیکی کمتر) فراهم می‌کند در حالی که که شکارچیان بزرگتر به دلیل نیاز به مقادیر بالاتر اکسیژن محلول، کمتر به این منطقه وارد می‌شوند. بنابراین بازسازی و پیش‌بینی نوسانات فصلی مرز لایه هیپوکسی و شدت و کیفیت PGW در دریای عمان می‌تواند در مدیریت منابع شیلاتی و برنامه ریزی صید در دریای عمان بسیار تأثیر گذار باشد. نوسانات فصلی اکسیژن محلول در لایه بالایی و PGW (۱۵۰ تا ۳۵۰ متر) تأثیرات قابل توجهی بر تنوع گونه‌ای و میزان صید در دریای عمان دارد (49).



شکل ۷: غلظت اکسیژن محلول در دریای عمان (GoO) و شمال غرب دریای عرب (NWAS) و میانگین گزارش شده در اطلس اقیانوس‌های جهان (WOA) در اندازه‌گیری های قبل از ۱۹۹۰ و بعد از ۱۹۹۰ میلادی. اقتباس از (Queste et al., 2018)

در دریای عمان در اعماق بیشتر از لایه PGW (اعماق بیش از ۴۰۰ متر) در هردو فصل تابستان و زمستان شرایط زیراکسیژنی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه ترموکلاین فصلی، آشفتگی های ناشی از توفان های حاره ای (57) و جریان PGW به این محدوده عمق نمی رسند، غلظت اکسیژن محلول به طور دایمی در شرایط زیر اکسیژنی باقی می‌ماند. این منطقه همان هسته OMZ دریای عمان است. همان‌طور که در مقدمه این گزارش به تفصیل اشاره شد، OMZ دریای عمان و دریای عرب در چند دهه گذشته تشدید شده است (49,50,55,56). مقادیر اکسیژن که در هسته OMZ دریای عمان و

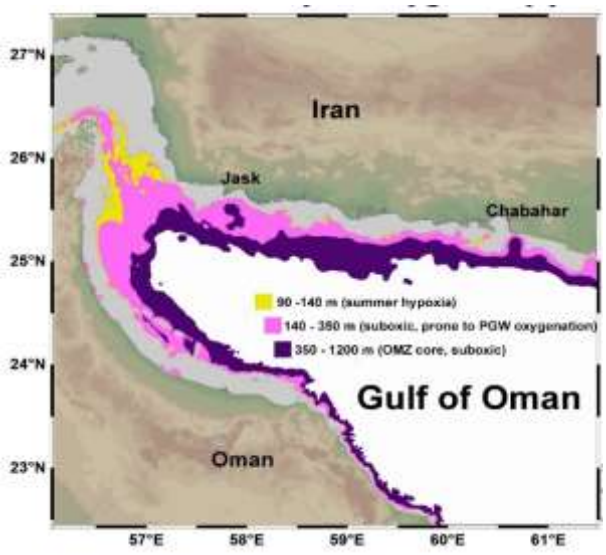
دریای عرب در زمان گشت بین‌المللی اقیانوس هند (IIOE) در سال ۱۹۶۰ در محدوده ۶ تا ۱۲ میکرومول بر کیلوگرم گزارش شده بود (58)، حالا به مقادیر کمتر از ۶ میکرومول بر کیلوگرم رسیده است. تشدید OMZ در دریای عمان و دریای عرب اثرات مخربی بر اکوسیستم های ارزشمند این ناحیه و معیشت ساکنین وابسته به آن دارد. موجودات دریایی که در لایه نزدیک بستر یا رسوبات نواحی دریایی حاشیه قاره زندگی می‌کنند بیشترین آسیب را از گسترش و تشدید هیپوکسی و شرایط زیر اکسیژنی متحمل می‌شوند. بخش وسیعی از سکونتگاه کفزیان شمال اقیانوس هند بویژه در بخش دریای عرب (و دریای عمان) در حاشیه قاره در منطقه OMZ قرار گرفته و بنابراین می‌تواند بشدت متأثر از کم اکسیژنی باشد (59). کمبود اکسیژن باعث کاهش تنوع زیستی کفزیان و غالب شدن گونه های مقاوم مانند پرتاران[۱] (نوعی کرم های حلقوی دریازی) در رسوب سطحی می‌شود (62–60). در شکل ۸ بستر دریای عمان در حاشیه قاره بر اساس قرار گرفتن در شرایط اکسیژنی مختلف تقسیم بندی شده است. بر اساس تقسیم بندی شکل ۷ سکونتگاه کفزیان در بستر دریای عمان به پنج بخش تقسیم شده است. ۱) نواحی کم عمق با شرایط اکسیژن بالاتر از آستانه هیپوکسی در لایه نزدیک بستر، ۲) نواحی با عمق ۹۰ تا ۱۴۰ متر که هیپوکسی تابستانی را تجربه می کنند (به‌جز دهانه تنگه هرمز که تحت تأثیر جریان PGW در طول سال از اکسیژن مناسبی برخوردار است)، ۳) نواحی با عمق ۱۴۰ تا ۳۵۰ متر که در بیشتر گستره دریای عمان در شرایط زیر اکسیژنی قرار دارد. این مناطق به‌ویژه در نیمه غربی دریای عمان در زمان هایی از سال این پتانسیل را دارند که تحت تأثیر جریان PGW اکسیژن رسانی شده و مقادیر اکسیژن بالاتر از شرایط زیراکسیژنی را تجربه می کنند. البته گرم شدن PGW در اثر گرمایش جهانی می‌تواند منجر به کاهش وسعت این منطقه شود. ۴) نواحی بستر با عمق ۳۵۰ تا ۱۲۰۰ متر در دریای عمان که در هسته OMZ قرار دارند و بنابراین اکسیژن دائماً در شرایط زیراکسیژنی قرار دارد. در این منطقه هیچ امیدی به دریافت اکسیژن در طول سال نیست. میزان اکسیژن نزدیک به صفر بوده و احتمالاً تنها گونه های مقاوم به این سطح از اکسیژن مانند پرتاران در نمونه های کفزی برداشت شده در این منطقه دیده می‌شود. ۵) نواحی بستر با عمق بیش از ۱۲۰۰ متر که پایین تر از هسته OMZ قرار گرفته و غلظت اکسیژن محلول از مرز زیراکسیژنی فراتر رفته و به سمت اعماق بیشتر در بستر دریای عمان مقادیر اکسیژن افزایش و شرایط برای کفزیان بهبود پیدا می‌کند.

در مناطقی که هیپوکسی به لایه نوری وارد شده است تأثیرات قابل توجهی بر جوامع فیتوپلانکتونی مشاهده شده است. تغییر گونه غالب فیتوپلانکتون از دیاتوم به داینوفلاژله (*Noctiluca Scintillance*) در شکوفایی های زمستانی دریای عرب و دریای عمان به تشدید OMZ و بروز هیپوکسی در لایه نزدیک سطح ارتباط داده شده است (15). این گذار پلانکتونی گسترده در دریای عرب و عمان احتمالاً اثرات وسیع و مخربی بر زنجیره غذایی و در نهایت صیادی را در این منطقه به دنبال خواهد داشت (63). مطالعات نشان می‌دهد حتی توزیع و مهاجرت عمودی زئوپلانکتون در مناطق دور از ساحل (64,65) و ساحلی (66) اقیانوس هند تحت تأثیر کاهش اکسیژن قرار گرفته است. در سطوح بالاتر زنجیره غذایی، در حالی که بیشتر ماهیان در مناطق کم اکسیژن حضور ندارند، فانوس ماهیان[۲] برای زندگی در هسته OMZ سازش یافته و به‌ویژه در ساعات روز جهت فرار از شکار شدن و نیز در جستجوی غذا به اعماق OMZ مهاجرت می‌کنند و در ساعات شب به لایه‌های سطحی بازمی‌گردند (64). با توجه به زی توده عظیم فانوس ماهیان در دریای عرب و عمان (حدود ۱۰۰ میلیون تن، (Gjsaeter, 1984) مهاجرت عمودی روزانه این ماهیان در نواحی OMZ و انتقال مواد آلی و معدنی (از طریق دفع و تغذیه) در ستون آب، از اهمیت بالای اکولوژیکی و بیوژئوشیمیایی برخوردار است.

گسترش و تشدید OMZ آثار منفی اجتماعی و اقتصادی نیز برای ساکنین نواحی ساحلی اقیانوس هند، دریای عرب و دریای عمان به همراه دارد. مرگ و میر ماهیان در اثر گسترش و انتقال آب های کم اکسیژن به زیستگاه‌های دیگر، تغییرات عمده در چرخه غذایی در دریای عمان که با غالب شدن داینوفلاژله *Noctiluca Scintillance* به سمت نامطلوبی پیش رفته و هنوز آثار آن بر صیادی در دریای عمان و عرب ارزیابی نشده و تولید مقادیر زیاد گاز نیتروس اکسید (N_2O) در هسته OMZ در این منطقه و تاثیرات قوی گلخانه ای و گرمایشی آن از جمله آثار منفی وجود و تشدید OMZ در دریای عمان و دریای عرب است.

[۱] Polychaeta

[۲] Myctophids



شکل ۸ تقسیم بندی بستر دریای عمان بر اساس شرایط غلظت اکسیژن. منطقه کم عمق خاکستری همیشه اکسیژن‌دار، منطقه هیپوکسی تابستانی (فصلی) در محدوده عمق ۹۰-۱۴۰ متر به رنگ زرد، منطقه با عمق ۱۴۰-۳۵۰ متر به رنگ صورتی در شرایط دائمی هیپوکسی تا زیر اکسیژنی اما با پتانسیل اکسیژن رسانی بوسیله جریان PGW، منطقه با عمق ۳۵۰-۱۲۰۰ متر به رنگ بنفش تیره که غلظت اکسیژن در آن همیشه نزدیک به صفر بوده و در هسته OMZ دریای عمان قرار می گیرد، و منطقه با عمق بیش از ۱۲۰۰ متر به رنگ سفید که غلظت اکسیژن محلول دوباره به بیش از شرایط زیراکسیژنی می رسد.

مدیریت و راهبردهای سیاست‌گذاری برای مقابله با اثرات کاهش اکسیژن

مدیریت و راهبردهای سیاست گذاری برای متوقف کردن یا کاستن اثرات کاهش اکسیژن در خلیج‌فارس و دریای عمان را می‌توان در سه دسته اقدام‌های مدیریتی اصلی طبقه بندی کرد. برخی از این اقدام ها که البته از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند باید در سطح بین المللی و برخی دیگر که اثرات کم دامنه تری دارند در سطوح منطقه ای و ملی پیگیری شوند. دسته اول اقدام‌های مدیریتی به "اقدام‌های کاهشی مبتنی بر اکوسیستم برای احیا و محافظت از محیط زیست" مربوط می‌شود (1). برخی از موارد دسته اول عبارت‌اند از الف) کاهش ورود مواد مغذی از طریق فاضلاب های شهری، صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی به محیط خلیج‌فارس با توجه به توسعه شهری و صنعتی در کشورهای حاشیه خلیج‌فارس می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود کیفیت آب در خلیج‌فارس داشته باشد. به نظر می رسد یکی از منابع اصلی ورود مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و حتی کربن آلی به خلیج‌فارس، فاضلاب های تصفیه نشده (یا تصفیه شده به روش های غیر مؤثر) شهری و صنایع است. این فاضلاب ها با محتوی بالای نیتروژن و فسفر و شاخص های BOD و COD بالاتر از حد مجاز، بدون شک منجر به افزایش شکوفایی های جلبکی در خلیج‌فارس و افزایش تولید مواد آلی زیستی می‌شود. اثرات این تغییرات به‌سرعت خود را در کاهش اکسیژن و اسیدی شدن به‌ویژه در لایه‌های پایینی ستون آب خلیج‌فارس نشان می‌دهد. کنترل و استفاده بهینه از کودهای کشاورزی به‌ویژه در دامنه های جنوبی زاگرس در استان های خوزستان، فارس، بوشهر و هرمزگان می‌تواند از اقدامات مؤثر در کاهش ورود مواد مغذی به خلیج‌فارس باشد. اگرچه ورودی رودخانه ها به خلیج‌فارس بسیار کم و غیر دائمی است ولی باید توجه داشت که در مواقع وقوع بارش های سیل آسا که در سال‌های اخیر نیز شاهد آن بوده ایم، مقادیر اضافی مواد مغذی تجمع یافته در زمین های کشاورزی و جلگه ها به صورت دفعی به دریا منتقل شده و اثرات خود را بر جای خواهد گذاشت. ب) کاهش تولید گاز های گلخانه ای به‌ویژه CO_2 یکی دیگر از مهم‌ترین اقدامات کاهشی برای مبارزه با فقر اکسیژن و اسیدی شدن دریاها است. کاهش تولید گازهای گلخانه ای منجر به کاهش شدت گرمایش محیط‌های دریایی می‌شود و در نتیجه سرعت از دست دادن اکسیژن در دریاها و اقیانوس‌ها کاسته می‌شود. البته این هدف را شاید بتوان دشوارترین و دوردست‌ترین اقدام کاهشی برشمرد چرا که اجرای آن نیازمند اجماع مؤثر بین المللی است که با معادلات اقتصادی، اجتماعی و سیاسی جاری حاکم در جهان و علی رقم وجود توافقاتی مانند پیمان اقلیمی پاریس، همچنان دست نیافتنی به نظر می رسد ج) نظارت مؤثر و کاهش تولید ضایعات آلی در صنعت پرورش آبزیان در قفس یکی دیگر از اقدام‌های کاهشی منطقه ای است که می‌تواند به‌ویژه در مقیاسی کوچکتر در کنترل هیپوکسی و اسیدی شدن سواحل خلیج‌فارس و سواحل مکران مؤثر باشد. مواد آلی ناشی از غذا دهی، مدفوع و اجساد آبزیان می‌تواند منجر به ایجاد مناطق مرده (کم اکسیژن تا بدون اکسیژن) در رسوب و لایه نزدیک بستر نواحی اطراف قفس ها شود و تنوع زیستی را به صورت موضعی نابود کند.

دسته دوم "اقدام‌های مبتنی بر سازگاری برای بازسازی و حفاظت از موجودات دریایی و شیلات" است (1). از جمله این اقدام ها عبارت‌اند از الف) اتخاذ استراتژی های برنامه ریزی فضایی دریایی و مدیریت شیلات برای رسیدگی به آسیب پذیری های ناشی از کاهش اکسیژن و حفاظت از گونه‌ها و زیستگاه‌های آسیب دیده. ایجاد مناطق حفاظت شده دریایی و مناطق صید ممنوع در مناطقی با اکسیژن خوب که می توانند به عنوان پناهگاه عمل کنند. هنگامی که اکسیژن کم است باید از جمعیت آبزیان محافظت شود. ب) اثرات کم اکسیژنی بر تولید و مرگ و میر گونه های ماهیان و زیستمندان غیر شیلاتی خلیج‌فارس و دریای عمان برآورد شده و در تعیین محدودیت های صیادی به عنوان یک فاکتور مؤثر در نظر گرفته شود.

دسته سوم "پیاده‌سازی و حفظ برنامه های پایش و تجزیه‌وتحلیل اطلاعات حاصل از آن" است. تدوین برنامه‌های پایش و نظارت،

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و انتشار نتایج برای شناسایی مشکلات و تعیین اثربخشی اقدام‌های مدیریتی و تلاش‌هایی که برای احیا و بازسازی منابع زیستی صورت گرفته، ضروری است. در واقع تلاش برای یکپارچه سازی تحقیقات، مدیریت و اقدام‌های سیاستی در دریاها و اقیانوس‌ها در همه رشته‌های زیست شناسی، ژئوشیمی و فیزیک، در مورد همه مشکلات ناشی از تغییر اقلیم مانند گرمایش، اسیدی شدن و کاهش اکسیژن، و در همه بخش های دانشگاهی، صنعتی، دولتی و نظارتی، مؤثرترین نقشه راهی است که برای مبارزه با اثرات تغییر اقلیم بر منابع زیستی دریایی توصیه می‌شود.

مشارکت نویسندگان

ابوالفضل صالح: جمع آوری اطلاعات منتشر شده، تحلیل و آنالیز اطلاعات، نگارش نسخه اولیه مقاله، بازخوانی و ویرایش نهایی مقاله.
حمید ارشادی فر: تحلیل و آنالیز اطلاعات، بازخوانی و ویرایش نهایی مقاله

تشکر و قدردانی *(اختیاری)*

از پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی به دلیل ایجاد بستر مناسب برای انجام این تحقیق قدر دانی می گردد.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع

[1] . Breitburg D, Levin LA, Oschlies A, Grégoire M, Chavez FP, Conley DJ, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. Science (1979) [Internet]. 2018 Jan 5;359(6371):eaam7240. Available from: http://science.sciencemag.org/content/359/6371/eaam7240.abstract

[2] . Norris RD, Kirtland Turner S, Hull PM, Ridgwell A. Marine ecosystem responses to Cenozoic global change. Science (1979) [Internet]. 2013 Aug 2 [cited 2022 Nov 2];341(6145):492–8. Available from: https://www.science.org/doi/10.1126/science.1240543

[3] . Watson AJ. Oceans on the edge of anoxia. Science (1979). 2016 Dec 23;354(6319):1529–30.

[4] . Codispoti LA, Yoshinari T, Devol AH. Suboxic respiration in the oceanic water column. In: Giorgio PA del, B.Williams PJ le, editors. Respiration in Aquatic Ecosystems. 1st ed. New York: Oxford University Press Inc.; 2005. p. 326.

[5] . Schmidtko S, Stramma L, Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. Nature. 2017;542(7641):335–9.

[6] . Stramma L, Schmidtko S, Levin LA, Johnson GC. Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2010;57(4):587–95.

[7] . Diaz RJ, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science (1979). 2008;321(5891):926–9.

[8] . Kralj M, Lipizer M, Čermelj B, Celio M, Fabbro C, Brunetti F, et al. Hypoxia and dissolved oxygen trends in the northeastern Adriatic Sea (Gulf of Trieste). Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2019;164:74–88.

[9] . Carstensen J, Andersen JH, Gustafsson BG, Conley DJ. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014;111(15):5628–33.

[10] . Carstensen J, Conley DJ. Baltic Sea hypoxia takes many shapes and sizes. Limnol Oceanogr Bull. 2019;28(4):125–9.

[11] . Hallegraeff GM. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge 1. J Phycol. 2010;46(2):220–35.

[12] . Keeling RF, Körtzinger A, Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world. 2009;

[13] . Kountoura K, Zacharias I. Annual hypoxia dynamics in a semi-enclosed Mediterranean gulf. Journal of Marine Systems. 2014;139:320–31.

[14] . Baumann H. Combined effects of ocean acidification, warming, and hypoxia on marine organisms. Limnol Oceanogr e-Lectures. 2016;6:1–43.

[15] . do Rosário Gomes H, Goes JI, Matondkar SGP, Buskey EJ, Basu S, Parab S, et al. Massive outbreaks of Noctiluca scintillans blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia. Nat Commun. 2014;5:4862.

[16] . Feely RA, Okazaki RR, Cai WJ, Bednaršek N, Alin SR, Byrne RH, et al. The combined effects of acidification and hypoxia on pH and aragonite saturation in the coastal waters of the California current ecosystem and the northern Gulf of Mexico. Cont Shelf Res. 2018;152:50–60.

[17] . Fennel K, Testa JM. Biogeochemical controls on coastal hypoxia. Ann Rev Mar Sci. 2019;11:105–30.

[18] . Gobler CJ, Baumann H. Hypoxia and acidification in ocean ecosystems: coupled dynamics and effects on marine life. Biol Lett. 2016;12(5):20150976.

[19] . Thomas Y, Flye-Sainte-Marie J, Chabot D, Aguirre-Velarde A, Marques GM, Pecquerie L. Effects of hypoxia on metabolic functions in marine organisms: Observed patterns and modelling assumptions within the context of Dynamic Energy Budget (DEB) theory. J Sea Res. 2019;143:231–42.

[20] . Zhai W, Zhao H, Su J, Liu P, Li Y, Zheng N. Emergence of summertime hypoxia and concurrent carbonate mineral suppression in the central Bohai Sea, China. J Geophys Res Biogeosci. 2019;124(9):2768–85.

[21] . Al-Yamani FY, Polikarpov I, Saburova M. Marine life mortalities and Harmful Algal Blooms in the Northern Arabian Gulf. Aquat Ecosyst Health

Economic Zone (EEZ) of Qatar during summer season. Estuar Coast Shelf Sci [Internet]. 2015;159:60–8. Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771415001006

[36] . Naqvi SWA. Deoxygenation in marginal seas of the Indian Ocean. Front Mar Sci. 2021;8:88.

[37] . Naqvi SWA, Narvekar P V, Desa E. Coastal biogeochemical processes in the North Indian Ocean (14, SW). In Harvard University Press; 2006.

[38] . Naqvi SWA, Sarma V, Jayakumar DA. Carbon cycling in the northern Arabian Sea during the northeast monsoon: Significance of salps. Mar Ecol Prog Ser. 2002;226:35–44.

[39] . Madhupratap M, Kumar SP, Bhattathiri PMA, Kumar MD, Raghukumar S, Nair KKC, et al. Mechanism of the biological response to winter cooling in the northeastern Arabian Sea. Nature. 1996;384(6609):549–52.

[40] . Paparella F, Xu C, Vaughan GO, Burt JA. Coral Bleaching in the Persian/Arabian Gulf Is Modulated by Summer Winds. Vol. 6, Frontiers in Marine Science. 2019. p. 205.

[41] . Rabalais NN, Turner RE, Wiseman Jr WJ. Gulf of Mexico hypoxia, aka" The dead zone". Annu Rev Ecol Syst. 2002;235–63.

[42] . Vaquer-Sunyer R, Duarte CM. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008;105(40):15452–7.

[43] . McIlwain JL, Harvey ES, Grove S, Shiell G, Al Oufi H, Al Jardani N. Seasonal changes in a deep-water fish assemblage in response to monsoon-generated upwelling events. Fish Oceanogr. 2011;20(6):497–516.

[44] . Al-Rasady IH, Meeuwig JJ, Claereboudt MR. Influence of Climate-Driven Low Oxygen Zones on Fish Biodiversity: A Case Study from the Arabian Sea. In: The Arabian Seas: Biodiversity, Environmental Challenges and Conservation Measures. Springer; 2021. p. 701–17.

[45] . Laffoley D, Baxter JM. Ocean deoxygenation: Everyone's problem-causes, impacts, consequences and solutions. IUCN Gland, Switzerland; 2019.

[46] . Abedi E, Seyfabadi J, Saleh A, Sari A. Mesozooplankton community in near-hypoxic and hypoxic layers of the Persian Gulf and the Gulf of Oman. Mar Pollut Bull. 2022;184:114146.

[47] . Hughes DJ, Alderdice R, Cooney C, Kühl M, Pernice M, Voolstra CR, et al. Coral reef survival under accelerating ocean deoxygenation. Nat Clim Chang. 2020;10(4):296–307.

[48] . de Verneil A, Burt JA, Mitchell M, Paparella F. Summer Oxygen Dynamics on a Southern Arabian Gulf Coral Reef. Front Mar Sci. 2021;8(November):1–14.

[49] . Queste BY, Vic C, Heywood KJ, Piontkovski SA. Physical Controls on Oxygen Distribution and Denitrification Potential in the North West Arabian Sea. Geophys Res Lett. 2018;45(9):4143–52.

Manag [Internet]. 2020;23(2):196–209. Available from: https://doi.org/10.1080/14634988.2020.1798157

[22] . Breitburg D, Grégoire M, Isensee K [2]. The Ocean is losing its breath: declining oxygen in the world's ocean and coastal waters; summary for policy makers. 2018.

[23] . Maltby KM, Howes EL, Lincoln S, Pinnegar JK, Buckley P, Ali TS, et al. Marine climate change risks to biodiversity and society in the ROPME Sea Area. Clim Risk Manag. 2022;35(February):100411.

[24] . Lincoln S, Buckley P, Howes EL, Maltby KM, Pinnegar JK, Ali TS, et al. A Regional Review of Marine and Coastal Impacts of Climate Change on the ROPME Sea Area. 2021;1–34.

[25] . Ben-Hasan A, Christensen V. Vulnerability of the marine ecosystem to climate change impacts in the Arabian Gulf an urgent need for more research. Glob Ecol Conserv. 2019;17:e00556.

[26] . Lachkar Z, Mehari M, Al Azhar M, Lévy M, Smith S. Fast local warming is the main driver of recent deoxygenation in the northern Arabian Sea. Biogeosciences. 2021 Oct 29;18(20):5831–49.

[27] . Burt JA, Paparella F, Al-Mansoori N, Al-Mansoori A, Al-Jailani H. Causes and consequences of the 2017 coral bleaching event in the southern Persian/Arabian Gulf. Coral Reefs. 2019;38(4):567–89.

[28] . Al-Yamani F, Naqvi SWA. Chemical oceanography of the Arabian Gulf. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2019;161:72–80.

[29] . Lachkar Z, Mehari M, Lévy M, Paparella F, Burt JA. Recent expansion and intensification of hypoxia in the Arabian Gulf and its drivers. Front Mar Sci. 2022;9.

[30] . Saleh A, Abtahi B, Mirzaei N, Chen CTA, Ershadifar H, Ghaemi M, et al. Hypoxia in the Persian Gulf and the Strait of Hormuz. Mar Pollut Bull [Internet]. 2021;167:112354. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X2100388X

[31] . Grasshoff K. The hydrochemistry of landlocked basins and fjords. In: Riley JP, Skirrow G, editors. The Chemical Oceanography. London: Academic Press; 1976. p. 455–597.

[32] . Brewer PG, Dyrssen D. Chemical oceanography of the Persian Gulf. Prog Oceanogr. 1985;14:41–55.

[33] . El Samrah MI, El Gindy AAH. Vertical Distribution And Inter-Relations Of Oxygen And Nutrients In The Arabian Gulf And The Gulf Of Oman In Summer. Qatar University Science Journal. 1990;10:445–64.

[34] . Hashimoto S, Tsujimoto R, Maeda M, Ishimaru T, Yoshida J, Takasu Y, et al. Distribution of nutrient, nitrous oxide and chlorophyll a of RSA: Extremely high ratios of nitrite to nitrate in whole water column. In: Otsuki A, Abdulraheem MY, Reynolds RM, editors. Offshore Environment of the ROPME Sea Area after the War-Related Oil Spill. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB); 1998. p. 99–124.

[35] . Al-Ansari EMAS, Rowe G, Abdel-Moati MAR, Yigiterhan O, Al-Maslamani I, Al-Yafei MA, et al. Hypoxia in the central Arabian Gulf Exclusive

[59] . Helly JJ, Levin LA. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2004;51(9):1159–68.

[60] . Ingole BS, Sautya S, Sivadas S, Singh R, Nanajkar M. Macrofaunal community structure in the western Indian continental margin including the oxygen minimum zone. Marine Ecology. 2010;31(1):148–66.

[61] . Raman A V, Damodaran R, Levin LA, Ganesh T, Rao YK V, Nanduri S, et al. Macrobenthos relative to the oxygen minimum zone on the East Indian margin, Bay of Bengal. Marine ecology. 2015;36(3):679–700.

[62] . Levin LA, Ekau W, Gooday AJ, Jorissen F, Middelburg JJ, Naqvi SWA, et al. Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos. Biogeosciences. 2009;6(10):2063–98.

[63] . Goes J. An Ecosystem in Transition : The Emergence of Mixotrophy in the Arabian Sea. 2018;(July 2016).

[64] . Morrison JM, Codispoti LA, Smith SL, Wishner K, Flagg C, Gardner WD, et al. The oxygen minimum zone in the Arabian Sea during 1995. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 1999;46(8–9):1903–31.

[65] . Wishner KF, Gowing MM, Gelfman C. Mesozooplankton biomass in the upper 1000 m in the Arabian Sea: overall seasonal and geographic patterns, and relationship to oxygen gradients. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 1998;45(10–11):2405–32.

[66] . Madhupratap M, Nair SRS, Haridas P, Padmavati G. Response of zooplankton to physical changes in the environment: coastal upwelling along the central west coast of India. J Coast Res. 1990;413–26.

[67] . GjØsaeter J. Mesopelagic fish, a large potential resource in the Arabian Sea. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers. 1984;31(6):1019–35.

[50] . Lachkar Z, Levy M, Smith S. Strong Intensification of the Arabian Sea Oxygen Minimum Zone in Response to Arabian Gulf Warming. Geophys Res Lett. 2019 May 8;

[51] . Al-Said T, Naqvi SWA, Al-Yamani F, Goncharov A, Fernandes L. High total organic carbon in surface waters of the northern Arabian Gulf: implications for the oxygen minimum zone of the Arabian Sea. Mar Pollut Bull. 2018;129(1):35–42.

[52] . Lachkar Z, Lévy M, Hailegeorgis D, Vallivattathillam P. Differences in recent and future trends in the Arabian Sea Oxygen Minimum Zone: processes and uncertainties. Front Mar Sci. 2023;10:1122043.

[53] . Bange HW, Naqvi SWA, Codispoti LA. The nitrogen cycle in the Arabian Sea. Prog Oceanogr [Internet]. 2005;65(2):145–58. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661105000406

[54] . Rixen T, Cowie G, Gaye B, Goes J, do Rosário Gomes H, Hood RR, et al. Reviews and syntheses: Present, past, and future of the oxygen minimum zone in the northern Indian Ocean. Biogeosciences [Internet]. 2020 Dec 4;17(23):6051–80. Available from: https://bg.copernicus.org/articles/17/6051/2020/

[55] . Ito T, Minobe S, Long MC, Deutsch C. Upper ocean O2 trends: 1958–2015. Geophys Res Lett. 2017;44(9):4214–23.

[56] . Piontkovski SA, Al-Oufi HS. The Omani shelf hypoxia and the warming Arabian Sea. International Journal of Environmental Studies. 2015;72(2):256–64.

[57] . Lahijani H, Ghafarian P, Saleh A, Kaveh-Firouz A, Mohammadi A, Azizpour J, et al. Response of shelf waters in the northern Gulf of Oman to the passage of tropical Cyclone Shaheen (2021). Dynamics of Atmospheres and Oceans [Internet]. 2024;106:101449. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377026524000174

[58] . Naqvi SWA. 2.3 Evidence for ocean deoxygenation and its patterns: Indian Ocean. In 2019.

در فایل **بدون نام**، این بخش حذف شود

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Saleh, A. Chemistry (Associate Professor), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science , Tehran, Iran

✉ *saleh.ershadifar@inio.ac.ir* . 0000-0003-4795-8737

Ershadifar, H. Chemistry (Assistant Professor), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science , Tehran, Iran

✉ *hamid.ershadifar@inio.ac.ir* . 0000-0003-0383-0133

این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Citation (Vancouver)

http://doi.org/10.52547/joc.14.56.4

http://joc.inio.ac.ir/article-1-1781-fa.html

https://orcid.org/0000-0003-4795-8737

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.