



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Seasonal Variability of the Carbonate System in Coral Reef Waters of the Persian Gulf and Its Implications for Calcification and Organic Carbon Production

Abolfazl Saleh *¹, Mohammadali Hamzeh¹, Davoud Jahedi Vaighan¹, Maryam Mohammadi²¹ Ocean Sciences Research Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Iran² Environment Department, Kish Free Trade Zone Organization, Kish Island, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2026/04/18

Revised: 2026/05/30

Accepted: 2026/03/6

Keywords:

Persian Gulf

Carbonate chemistry

Coral reefs

Calcification

Aragonite saturation state

*Corresponding author:

✉ saleh@inio.ac.irDoi: [10.52547/joc.16.64.9](https://doi.org/10.52547/joc.16.64.9)ORID: [0000-0003-4795-8737](https://orcid.org/0000-0003-4795-8737)

ABSTRACT

Background and Objectives: Coral reef habitats of the Persian Gulf are ecologically and economically important, supporting biodiversity, food resources, coastal protection, research, and tourism. However, they are increasingly threatened by local and global stressors, including oil pollution, coastal development, nutrient and wastewater inputs, ocean warming, and acidification. Given the key role of carbonate chemistry in coral health, this study investigated seasonal variability of the carbonate system in Iranian waters of the Persian Gulf through one year of monthly monitoring at three reef regions—Khark, Kish, and Qeshm—combined with data from a summer 2021 oceanographic cruise.

Methods: Monthly sampling was carried out from November 2021 to December 2022 at 1 m below surface. Physical and chemical parameters, including temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, nutrients, and total alkalinity (A_T) were measured. Carbonate system parameters such as dissolved inorganic carbon (DIC), partial pressure of CO_2 (pCO_2), aragonite saturation state (Ω_{ar}), and salinity-normalized indices were calculated. Summer conditions across the Persian Gulf were further evaluated using data from the September 2021 research cruise.

Findings: Mean annual temperatures at Khark, Kish, and Qeshm were 26.6, 28.8, and 28.0 °C, respectively, with corresponding mean salinities of 39.9, 38.3, and 37.2. Mean A_T values were 2534, 2456, and 2421 $\mu\text{mol/kg}$, and mean DIC values were 2147, 2078, and 2062 $\mu\text{mol/kg}$, respectively. Minimum DIC occurred in summer and maximum values during colder seasons. Annual mean pH (~ 8.04) and pCO_2 ($\sim 410\text{--}416 \mu\text{atm}$) showed no significant spatial differences, and reef waters alternated seasonally between acting as a CO_2 source and sink. Waters at all sites remained supersaturated with respect to aragonite throughout the year, with highest saturation states in warmer months. Alkalinity depletion relative to the Indian Ocean source water dilution line indicates substantial biological $CaCO_3$ precipitation within the Gulf, with the greatest reduction observed at Khark and the lowest at Qeshm, consistent with water residence time and proximity to the Strait of Hormuz. The ratio of organic carbon production to $CaCO_3$ formation was estimated at 2.6:1 in summer and approximately 1.1:1 on an annual basis, indicating a relative increase in photosynthetic production compared to calcification in recent decades.

Conclusion: Carbonate chemistry in the reef waters of the Persian Gulf is strongly controlled by temperature, intense evaporation, water residence time, and biogeochemical processes. Although aragonite saturation remains consistently supersaturated, the strong seasonal temperature variability makes the bicarbonate-to-hydrogen ion ratio a more reliable indicator of seasonal effects on coral calcification. The increasing dominance of photosynthesis relative to calcification in recent decades is likely linked to climate change, nutrient enrichment, and declining coral cover. Overall, despite persistent carbonate supersaturation, Persian Gulf reef habitats remain vulnerable to climatic and anthropogenic pressures, highlighting the need for continued carbonate chemistry monitoring.



NUMBER OF TABLES

1



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF REFERENCES

48

تغییرات فصلی سامانه کربنات در آب‌های مرجانی خلیج فارس و پیامدهای آن برای فرایندهای کلسیفیکاسیون و تولید کربن آلی

ابوالفضل صالح*؛ محمدعلی حمزه؛ داوود جاهدی وایقان؛ مریم محمدی^۲

^۱ پژوهشکده علوم اقیانوسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، ایران

^۲ اداره حفاظت از محیط زیست سازمان منطقه آزاد کیش، جزیره کیش، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱/۲۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۵/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵</p>	<p>پیشینه و اهداف: زیستگاه‌های مرجانی خلیج فارس از نظر بوم‌شناختی و اقتصادی اهمیت زیادی دارند و در تنوع زیستی، تأمین غذا، حفاظت ساحلی، پژوهش و گردشگری نقش دارند. این زیستگاه‌ها تحت تأثیر تنش‌های محلی و جهانی، از جمله آلودگی نفتی، توسعه ساحلی، ورود مواد مغذی و فاضلاب، گرمایش و اسیدی شدن آب دریا قرار دارند. با توجه به نقش شیمی کربنات در سلامت مرجان‌ها، این پژوهش به بررسی تغییرات فصلی سامانه کربنات در آب‌های ایرانی خلیج فارس پرداخت. برای این منظور، پایش ماهانه یک‌ساله در سه منطقه مرجانی خارک، کیش و قشم انجام و با داده‌های گشت دریایی تابستان ۲۰۲۱ تلفیق شد.</p>
<p>واژگان کلیدی: خلیج فارس شیمی کربنات مرجان‌ها کلسیفیکاسیون حالت اشباع آراگونیت</p>	<p>روش‌ها: نمونه‌برداری از نوامبر ۲۰۲۱ تا دسامبر ۲۰۲۲ به صورت ماهانه و از عمق یک‌متر زیر سطح انجام شد. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی شامل دما، شوری، اکسیژن محلول، pH، مواد مغذی و قلیابیت کل (At) اندازه‌گیری شد. شاخص‌های شیمی کربنات از جمله کربن معدنی محلول (DIC)، فشار جزئی CO₂، حالت اشباع آراگونیت و نسبت‌های نرمال شده محاسبه گردید. برای تحلیل وضعیت تابستانی کل خلیج فارس از داده‌های گشت دریایی شهریور ۲۰۲۱ استفاده شد.</p>
<p>*نویسنده مسئول ✉ saleh@inio.ac.ir</p>	<p>یافته‌ها: میانگین سالانه دما در مناطق خارک، کیش و قشم به ترتیب ۲۶٫۶، ۲۸٫۸ و ۲۸٫۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین شوری ۳۹٫۹، ۳۸٫۳ و ۳۷٫۲ بود. میانگین At به ترتیب ۲۵۳۴، ۲۴۵۶ و ۲۴۲۱ و میانگین DIC برابر ۲۱۴۷، ۲۰۷۸ و ۲۰۶۲ میکرومول بر کیلوگرم به دست آمد. کمینه DIC در تابستان و بیشینه آن در فصول سرد مشاهده شد. میانگین سالانه pH (حدود ۸٫۰۴) و pCO₂ (حدود ۴۱۰-۴۱۶ میکرواتموسفیر) تفاوت معنی‌داری میان جزایر نشان نداد و آب‌ها در ماه‌های مختلف می‌توانند نقش منبع یا مخزن CO₂ را ایفا کنند. آب‌های هر سه منطقه در تمام سال نسبت به آراگونیت در حالت فوق اشباع بودند و بیشترین مقادیر اشباع در فصول گرم ثبت شد. کاهش قلیابیت نسبت به خط رقیق‌شدگی آب اقیانوس هند بیانگر ترسیب زیستی کلسیم کربنات در خلیج فارس است؛ این کاهش در خارک بیشترین و در قشم کمترین مقدار را نشان داد که با زمان ماندگاری آب و فاصله از تنگه هرمز سازگار است. نسبت تولید کربن آلی به تشکیل کلسیم کربنات در تابستان ۲٫۶ به ۱ و میانگین سالانه حدود ۱٫۱ به ۱ برآورد شد که تایید کننده افزایش نسبت تولید کربن آلی توسط فتوسنتز نسبت به تولید زیستی کلسیم کربنات در چند دهه گذشته است.</p>
<p>Doi: 10.52547/joc.16.64.9 ORID: 0000-0003-4795-8737</p>	<p>نتیجه‌گیری: شیمی کربنات آب‌های مرجانی خلیج فارس تحت تأثیر دما، تبخیر شدید، زمان ماندگاری آب و فرایندهای زیست‌ژئوشیمیایی قرار دارد. با وجود فوق اشباع بودن همیشگی آراگونیت، نوسانات شدید دمایی فصلی باعث می‌شود نسبت هیدروژن کربنات به یون هیدروژن شاخصی قابل‌انکاتر برای ارزیابی اثر تغییرات فصلی بر کلسیفیکاسیون مرجان‌ها باشد. افزایش نسبی سهم فتوسنتز در مقایسه با کلسیفیکاسیون در دهه‌های اخیر احتمالاً با تغییرات اقلیمی، افزایش مواد مغذی و کاهش پوشش مرجانی مرتبط است. در مجموع، زیستگاه‌های مرجانی خلیج فارس با وجود فوق اشباع بودن کربنات، نسبت به فشارهای اقلیمی و انسانی حساس‌اند و پایش مستمر شیمی کربنات برای ارزیابی تاب‌آوری آینده آن‌ها ضروری است.</p>

مقدمه

بوم‌سازگان‌های مرجانی از مهم‌ترین و پربازده‌ترین اکوسیستم‌های دریایی مناطق گرمسیری و زیرگرمسیری به شمار می‌روند که با ایجاد ساختارهای سه‌بعدی پیچیده، نقش اساسی در حفظ تنوع زیستی، تأمین منابع شیلاتی، حفاظت از سواحل و پشتیبانی از معیشت جوامع ساحلی ایفا می‌کنند [۱]. با این حال، این زیستگاه‌ها تحت تأثیر هم‌زمان فشارهای محلی نظیر آلودگی، توسعه‌های ساحلی و صید بی‌رویه و نیز تنش‌های جهانی ناشی از تغییر اقلیم شامل گرمایش آب دریا، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و افزایش فراوانی رخدادهای حدی قرار دارند [۲].

خلیج فارس به عنوان یکی از گرم‌ترین و شورترین پهنه‌های دریایی جهان، میزبان شمالی‌ترین آبسنگ‌های مرجانی اقیانوس هند غربی است [۳]. شرایط حدی دما و شوری در این حوضه نیمه‌بسته، مرجان‌ها را در آستانه تحمل فیزیولوژیک قرار داده است؛ به گونه‌ای که دمای سطح آب در تابستان به بیش از ۳۴-۳۶ درجه سانتی‌گراد رسیده و در زمستان به کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد [۴]. این دامنه نوسان شدید، همراه با رخداد‌های مکرر سفیدشدگی در دهه‌های اخیر، کاهش چشمگیر پوشش مرجانی را در بسیاری از مناطق خلیج فارس در پی داشته است [۵ و ۶]. برآوردها نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از وسعت تاریخی آبسنگ‌های این منطقه طی دهه‌های گذشته از بین رفته است [۷]. افزایش تدریجی دمای سطحی آب دریا در دهه‌های اخیر از طرفی منجر به ایجاد استرس مضاعف کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب و رخداد پدیده‌های هیپوکسی بویژه در لایه‌های نزدیک بستر نواحی عمیق خلیج فارس شده است که می‌تواند تهدیدی بالقوه برای کفزیان خلیج فارس باشد [۸].

علاوه بر تنش گرمایی، شیمی کربنات آب دریا یکی از عوامل کلیدی کنترل‌کننده رشد و کلسیفیکاسیون مرجان‌هاست. کاهش pH و حالت اشباع آراگونیت (Ω_{ar}) در نتیجه افزایش CO_2 اتمسفری می‌تواند نرخ کلسیفیکاسیون را به طور معنی‌داری کاهش دهد [۹ و ۱۰]. اگرچه مرجان‌ها قادرند در محل کلسیفیکاسیون شرایط شیمیایی مطلوبی ایجاد کنند، اسیدی شدن آب دریا هزینه انرژی این فرایند را افزایش داده و ممکن است در تعامل با دمای بالا به تضعیف رشد اسکلتی و تغییر توازن بین تولید و فرسایش کربنات منجر شود [۱۱ و ۱۲]. در محیط‌هایی مانند خلیج فارس که نوسانات طبیعی روزانه و فصلی در pH، دما و شوری چشمگیر است، بررسی هم‌زمان این متغیرها برای درک پاسخ مرجان‌ها به تغییرات اقلیمی ضروری است [۱۳].

با وجود اهمیت اکولوژیک و اقتصادی آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس، هنوز داده‌های جامع و پیوسته‌ای که بتواند ارتباط میان متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی را در مقیاس زمانی مناسب آشکار سازد، محدود است [۱۴]. از این رو، پایش منظم پارامترهایی همچون دما، شوری، مواد مغذی،

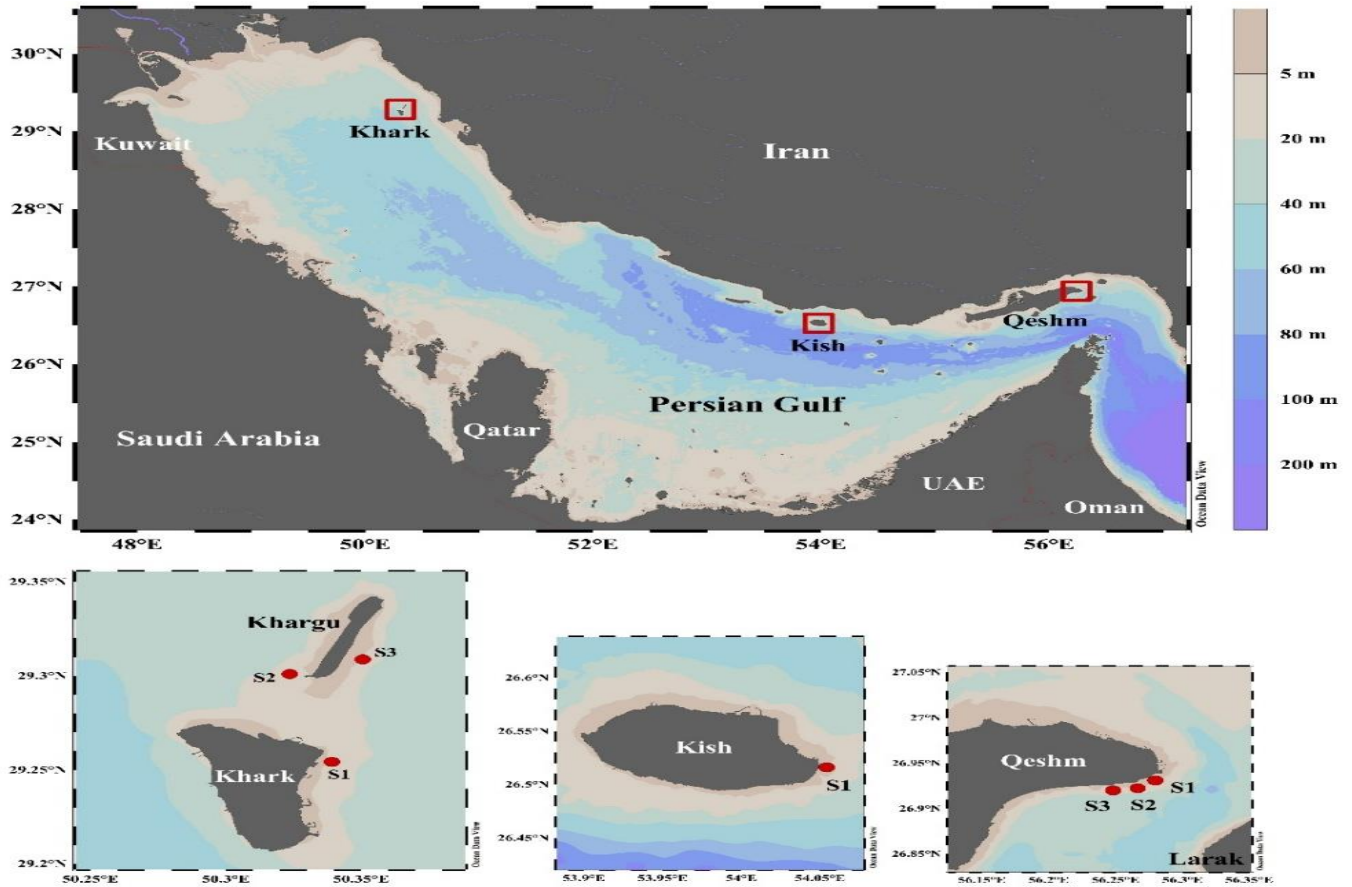
ذرات معلق و مؤلفه‌های سیستم کربنات در کنار ارزیابی وضعیت متابولیک آبسنگ‌ها، گامی اساسی برای تبیین پویایی این بوم‌سازگان‌های منحصربه‌فرد و پیش‌بینی آینده آن‌ها در شرایط گرمایش شتابان منطقه‌ای و جهانی محسوب می‌شود. در تحقیق پیش رو سعی بر آن بوده است تا علاوه بر جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و گزارش‌های موجود در مورد کیفیت شیمی آب در خلیج فارس بویژه در موضوع شیمی کربنات و اسیدی شدن، جهت تکمیل بانک اطلاعاتی موجود، نمونه برداری و تولید داده با تواتر یک بار در ماه به مدت یک سال در شرق و غرب محدوده خلیج فارس در نیمه ایرانی آن انجام شود (جزایر خارک، کیش و قشم) و از طرفی با آنالیز داده‌های گشت اقیانوس‌شناسی PGE2102 که توسط کشتی کاوشگر خلیج فارس در سپتامبر ۲۰۲۱ به دست آمده است [۱۵]، مقایسه و تحلیلی یکپارچه و جامع از وضعیت موجود شیمی کربنات در خلیج فارس با تأکید بر زیستگاه‌های مرجانی ارائه گردد.

روش پژوهش

منطقه و طراحی مطالعه

این پژوهش در سه منطقه مرجانی واقع در منتهی‌الیه شمال‌غربی خلیج فارس (جزایر خارک و خارگو)، بخش میانی (جزیره کیش) و بخش شرقی خلیج فارس (جزیره قشم) انجام شد. انتخاب این مناطق بر اساس گردان‌شناخته‌شده هیدروشیمیایی خلیج فارس و با هدف پوشش دامنه حداکثری تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی صورت گرفت [۱۵-۱۷]. بر اساس مطالعات پیشین، بیشینه شوری، قلیابیت و دامنه تغییرات فصلی دما در نواحی درونی و غربی خلیج فارس مشاهده می‌شود، در حالی که مناطق شرقی تحت تأثیر آب‌های ورودی از تنگه هرمز و دریای عمان، از نظر شوری و قلیابیت به شرایط نزدیک به اقیانوس هند گرایش داشته و نوسانات فصلی محدودتری را تجربه می‌کنند [۱۸]. در مقابل، غلظت مواد مغذی در مناطق شرقی معمولاً بیشتر از نواحی درونی گزارش شده است [۱۸ و ۱۹]. در اطراف جزایر خارک و خارگو سه ایستگاه، در جنوب شرق جزیره کیش (ساحل سیمرغ) یک ایستگاه و در جنوب دماغه شرقی جزیره قشم سه ایستگاه انتخاب شد. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس بازدید میدانی، تراکم مرجان‌های زنده و مشورت با غواصان و صیادان محلی انجام گرفت. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری پارامترها به صورت ماهانه و طی یک سال کامل (از نوامبر ۲۰۲۱ تا دسامبر ۲۰۲۲ میلادی) انجام شد. شکل (۱) موقعیت مناطق و ایستگاه‌های نمونه برداری و سنجش را نشان می‌دهد.

نمونه برداری‌ها در آب‌های مناطق مرجانی منتخب خلیج فارس از اواخر سال ۲۰۲۱ میلادی آغاز شد و حتی الامکان در فواصل یک ماهه به مدت تقریبی حدود یک سال انجام شد. جدول (۱) تاریخ‌های دقیق نمونه برداری را در جزایر خارک، کیش و قشم نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جزایر و ایستگاه های مورد مطالعه در خلیج فارس

جدول ۱: تاریخ نمونه برداری و اندازه گیری ها در جزایر خارک، کیش و قشم در فاصله نوامبر ۲۰۲۱ تا دسامبر ۲۰۲۲

No.	Khark	Kish	Qeshm
1	16-Nov-2021	1-Nov-2021	10-Dec-2021
2	11-Jan-2022	2-Dec-2021	6-Jan-2022
3	3-Feb-2022	30-Dec-2021	1-Feb-2022
4	9-Mar-2022	27-Jan-2022	9-Mar-2022
5	9-Apr-2022	24-Feb-2022	12-Apr-2022
6	16-May-2022	11-Apr-2022	26-May-2022
7	19-Jun-2022	12-May-2022	22-Jul-2022
8	24-Jul-2022	17-Jun-2022	25-Aug-2022
9	22-Aug-2022	14-Jul-2022	22-Sep-2022
10	19-Sep-2022	7-Aug-2022	20-Oct-2022
11	18-Oct-2022	10-Sep-2022	2-Dec-2022
12	24-Nov-2022	19-Oct-2022	-

داده‌های گشت اقيانوس شناسی

به منظور بررسی منطقه‌ای شیمی کربنات در نیمه ایرانی خلیج فارس و مقایسه با داده‌های به دست آمده از نمونه برداری فصلی جزایر مورد مطالعه، داده‌های ۳۴ ایستگاه سطحی از اروند تا تنگه هرمز در گشت تابستان ۱۴۰۰ (سپتامبر ۲۰۲۱ میلادی) که در گشت اقيانوس شناسی PGE2102 با کشتی کاوشگر خلیج فارس جمع آوری شده بود مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. به طور خلاصه در این گشت دریایی پروفیل‌های عمودی با مدل CTD مدل SeaSunTech-75M ثبت و متغیرهایی شامل عمق، دما، شوری، چگالی، هدایت الکتریکی، سرعت صوت، pH، اکسیژن محلول، کدورت و کلروفیل-آ با گام زمانی ۱ ثانیه اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آب با دستگاه روزت Hydro-Bios مجهز به ۱۲ بطری نیسکین ۱۰ لیتری برداشت و شیمی کربنات مطابق روش ذکر شده در زیر-بخش قبل اندازه‌گیری شد. پردازش داده‌ها و تهیه نقشه‌ها با Ocean Data View نسخه ۵,۷,۱ انجام شد [۲۳].

نتایج و بحث

اندازه‌گیری‌های میدانی ماهانه

دما

میانگین دمای ثبت شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری جزایر خارک و خارگو ($6,1 \pm 26,58$) درجه سانتیگراد و در گستره ۱۷,۸۷ تا ۳۴,۵۷ به دست آمد. دمای کمینه در ماه فوریه (میان زمستان) و دمای بیشینه در ماه آگوست (میان تابستان) ثبت شد (شکل ۲). در همین دوره زمانی، میانگین دمای آب در منطقه مرجانی جزیره کیش ۲۸,۷۷ در گستره ۲۲,۵ تا ۳۴ به دست آمد. دمای بیشینه در نیمه جولای و دمای کمینه در اواخر ژانویه مشاهده شد. میانگین دمای آب در نقاط اندازه‌گیری جزیره قشم ($4,0 \pm 27,96$) درجه سانتیگراد در گستره ۲۲,۲۷ تا ۳۳,۶ به دست آمد. کمینه دما در اوایل ماه فوریه و بیشینه دما در ماه سپتامبر ثبت شد. از نظر میانگین سالانه، آب‌های جزایر خارک و خارگو به عنوان خنک‌ترین و آب‌های جزیره کیش به عنوان گرم‌ترین مناطق مورد مطالعه در این تحقیق بودند. کمترین و بیشترین نوسانات فصلی دما به ترتیب مربوط به شرقی‌ترین و غربی‌ترین مناطق مورد مطالعه: قشم و خارک، بود.

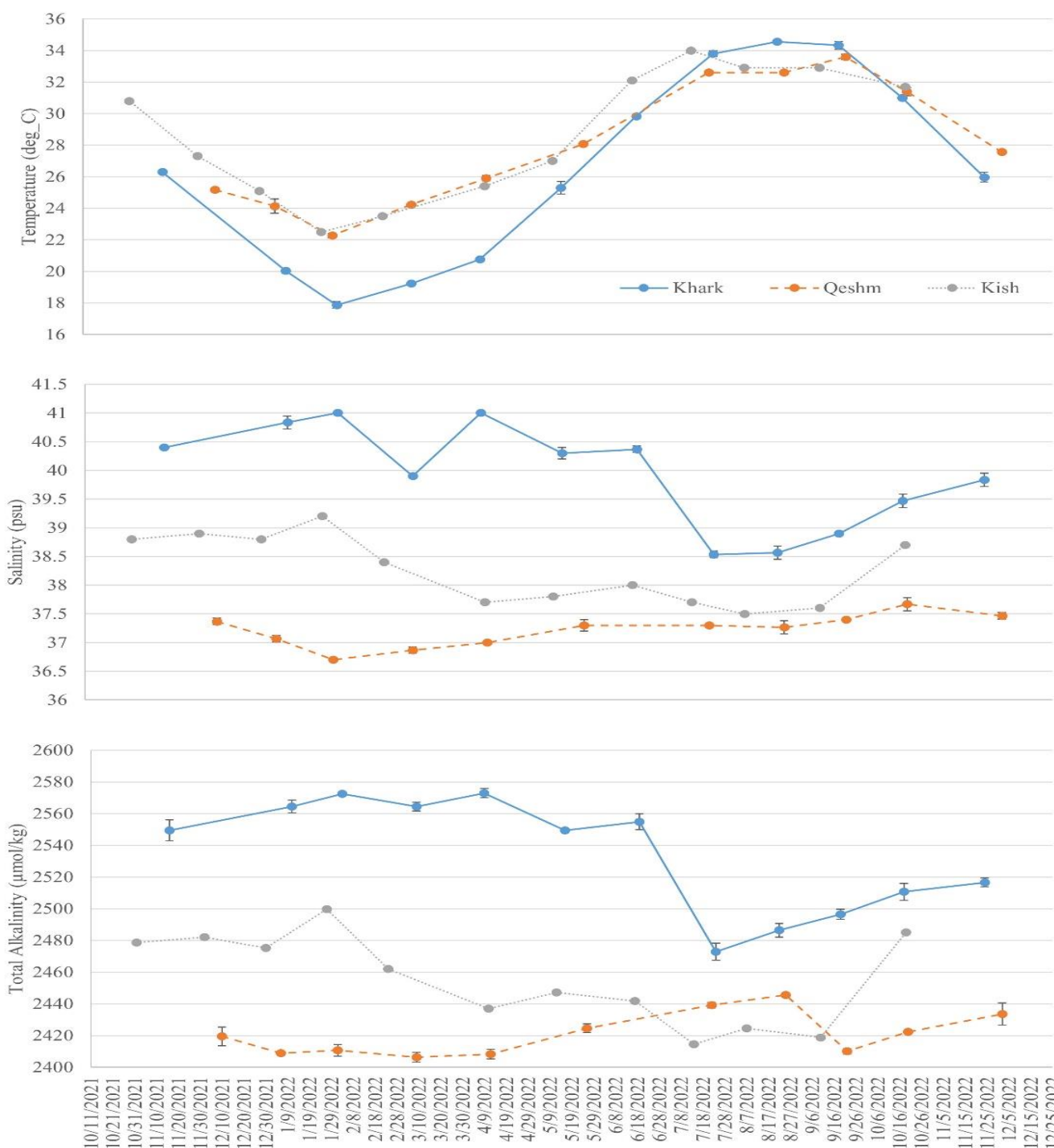
اکسیژن محلول و دمای آب در بازه زمانی ۱۱ تا ۱۴ با دستگاه HQ40D (Hach) مجهز به پروب نوری LDO اندازه‌گیری شد. برای تعیین شوری، نمونه‌های آب در بطری‌های بوروسیلیکات ۵۰۰ میلی‌لیتری برداشت و در آزمایشگاه با دستگاه inoLab IDS multi 9420 (WTW) اندازه‌گیری شدند.

pH در مقیاس یون هیدروژن کل در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (pH_25) با الکتروود ترکیبی شیشه/مرجع (PHC101, Hach) و با استفاده از بافر تریس دریایی (شوری ۳۸) مطابق دستورالعمل استاندارد تعیین شد [۲۰]. قلیابیت کل (At) بر اساس پروتکل استاندارد (پروتوکل SOP1 از مرجع [20]) نمونه‌برداری و با روش تیتراسیون پتانسیومتری دومرحله‌ای (SOP3b) اندازه‌گیری شد [۲۰]. نمونه‌ها در بطری‌های بوروسیلیکات ۵۰۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری، با ۱۰۰ میکرولیتر جیوه کلرید اشباع تثبیت و تا زمان آنالیز در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. به منظور کنترل صحت و دقت اندازه‌گیری‌ها، از آب دریای مرجع^۱ تهیه‌شده توسط آزمایشگاه A. Dickson در مؤسسه اقيانوس شناسی اسکریپس استفاده شد (CRM, batch#182, A.G. Dickson, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA, USA). این مواد مرجع دارای مقادیر گواهی‌شده برای قلیابیت کل و کربن معدنی محلول (DIC) بوده و به‌طور گسترده در مطالعات سامانه کربنات دریا برای کالیبراسیون و ارزیابی کیفیت داده‌ها به کار می‌روند. دقت روش (انحراف استاندارد) در حدود $3 \mu\text{mol/kg} \pm 0,15 (\%)$ بود.

سایر پارامترهای سیستم کربنات شامل DIC، فشار جزئی کربن دی‌اکسید (pCO_2)، گونه‌های کربن معدنی محلول در آب (CO_3^{2-} , HCO_3^-), و درجات اشباع کلسیت (Ω_{Ca}) و آراگونیت (Ω_{Ar}) با استفاده از نرم‌افزار CO2SYS-XLS [۲۱]. و بر اساس داده‌های pH, At, دما، شوری، فشار و غلظت‌های فسفات و سیلیکات محاسبه شد.

مواد مغذی محلول (نیترات، نیتريت، فسفات و سیلیکات) پس از فیلتراسیون با فیلتر ۰,۴۵ میکرون (سلولز استات) در ظروف ۱۲۵ میلی‌لیتری و در سه تکرار جمع‌آوری و در دمای کمتر از ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. آنالیز رنگ‌سنجی با دستگاه اسپکتروفوتومتری Specord 210 (Analytikjena) مطابق دستورالعمل (ROPME (1999) انجام شد [22].

¹ CRM



شکل ۲: نمودارهای تغییرات دما (درجه سانتی گراد)، شوری (psu) و قلیابیت کل (میکرومول بر کیلوگرم) در ماه های مختلف سال در مناطق مرجانی خارک (خط آبی)، کیش (نقطه چین خاکستری) و قشم (خط چین نارنجی)، از ماه نوامبر ۲۰۲۱ تا ماه دسامبر ۲۰۲۲.

کیش میانگین شوری در دوره مطالعه psu 38.26 ± 0.60 در گستره ۳۷.۵ تا ۳۹.۲ به دست آمد. مشابه جزیره خارک در آب های اطراف جزیره کیش نیز شوری های بالاتر مربوط به نیمه سرد سال و شوری های کمتر در تابستان مشاهده شد. میانگین شوری اندازه گیری شده در منطقه مرجانی قشم psu 37.22 ± 0.28 و در گستره ۳۶.۷۰ تا ۳۷.۶۷ ثبت شد. در

شوری

میانگین شوری اندازه گیری شده در منطقه مرجانی خارک و خارگو psu 39.93 ± 0.89 و در گستره ۳۸.۵۳ تا ۴۱.۰۰ ثبت شد. بیشترین شوری ها در ماه های سرد سال (فوریه تا آوریل) و کمترین شوری ها در نیمه گرم سال (جولای و آگوست) ثبت گردید (شکل ۲). در منطقه مرجانی جزیره

کربن معدنی محلول، DIC

میانگین غلظت کربن معدنی محلول در آب های مناطق مرجانی جزایر خارک و خارگو $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 78,9)$ ۲۱۴۷,۴ در گستره ۲۰۲۸,۷ تا ۲۲۳۷,۴ ثبت شد. مقادیر بیشینه کربن معدنی محلول در ماه های سرد سال، بویژه در ژانویه و فوریه مشاهده شد و مقادیر کمینه مربوط به گرمترین ماه های سال، آگوست و سپتامبر بود (شکل ۳). میانگین DIC در آب های مناطق مرجانی جزیره کیش $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 50,7)$ ۲۰۷۸,۶ در گستره ۲۰۰۵,۹ تا ۲۱۶۰,۰ ثبت شد. بیشینه DIC در ماه های سرد سال (ژانویه) و کمینه آن در فصل تابستان (ماه سپتامبر) مشاهده شد. میانگین DIC در آب های مناطق مرجانی جزیره قشم $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 30,3)$ ۲۰۶۲,۲ در گستره ۲۰۰۱,۳ تا ۲۰۸۷,۹ ثبت شد. کمینه DIC در فصل تابستان (ماه سپتامبر) مشاهده شد. توانایی بیشتر آب های سرد در نگهداری کربن دی اکسید، و اختلاط عمودی زمستانی ستون آب در خلیج فارس و به سطح آمدن آب های عمیق تر (و غنی از کربن دی اکسید) را می توان از دلایل بیشینه در فصل سرد عنوان کرد. از نظر مقدار DIC در آب (شامل همه گونه های کربن معدنی محلول: گاز کربن دی اکسید محلول، کربنیک اسید و یون های بیکربنات و کربنات) جزایر خارک و خارگو، جزیره کیش و در نهایت جزیره قشم در رتبه های اول تا سوم قرار می گیرند (رفتاری مشابه شوری و قلیائیت کل).

pH

میانگین pH در آب های مناطق مرجانی جزایر خارک و خارگو $(\pm 0,30)$ ۸,۰۵۳ در گستره ۸,۰۰۴ تا ۸,۰۹۷ ثبت شد. در تبعیت با تاثیر معکوس دمای آب، بیشینه pH در ماه های سرد سال و کمینه آن در ماه های گرم سال در این منطقه مشاهده می شود (شکل ۳). میانگین pH در آب های مناطق مرجانی جزیره کیش $(\pm 0,20)$ ۸,۰۳۹ در گستره ۷,۹۹۷ تا ۸,۰۶۲ به دست آمد. در آب های اطراف کیش نیز مقادیر pH در نیمه سرد سال قدری بیشتر از تابستان است. شرایط مشابهی برای آب های اطراف جزیره قشم نیز مشاهده شد. میانگین pH در منطقه مرجانی جزیره قشم $(\pm 0,21)$ ۸,۰۴۰ در گستره ۸,۰۱۶ تا ۸,۰۹۲ ثبت شد. با اینکه مقادیر میانگین به دست آمده نشان دهنده اسیدی تر بودن آب های کیش و قشم در مقایسه با خارک و خارگو است، با نگاهی به مقادیر انحراف استاندارد می توان نتیجه گرفت که این تفاوت ها در حدی نیست که معنی دار تلقی شود. شکل (۳) نشان می دهد که تقریباً در همه مناطق مورد مطالعه، در فصل تابستان مرجان ها آب های گرم تر و اسیدی تری را در اطراف خود تجربه می کنند.

فشار جزئی کربن دی اکسید آب، pCO₂

میانگین فشار جزئی کربن دی اکسید آب، pCO₂، در آب های مناطق مرجانی جزایر خارک و خارگو μatm (± 31) ۴۱۱ در گستره ۳۶۱ تا ۴۷۱ ثبت شد. کمینه pCO₂ در ماه نوامبر و بیشینه آن در ماه ژوئن مشاهده شد. میانگین جهانی غلظت کربن دی اکسید اتمسفری در سال ۲۰۲۲ در گستره ppm ۴۱۵ تا ۴۲۱ گزارش شده است.

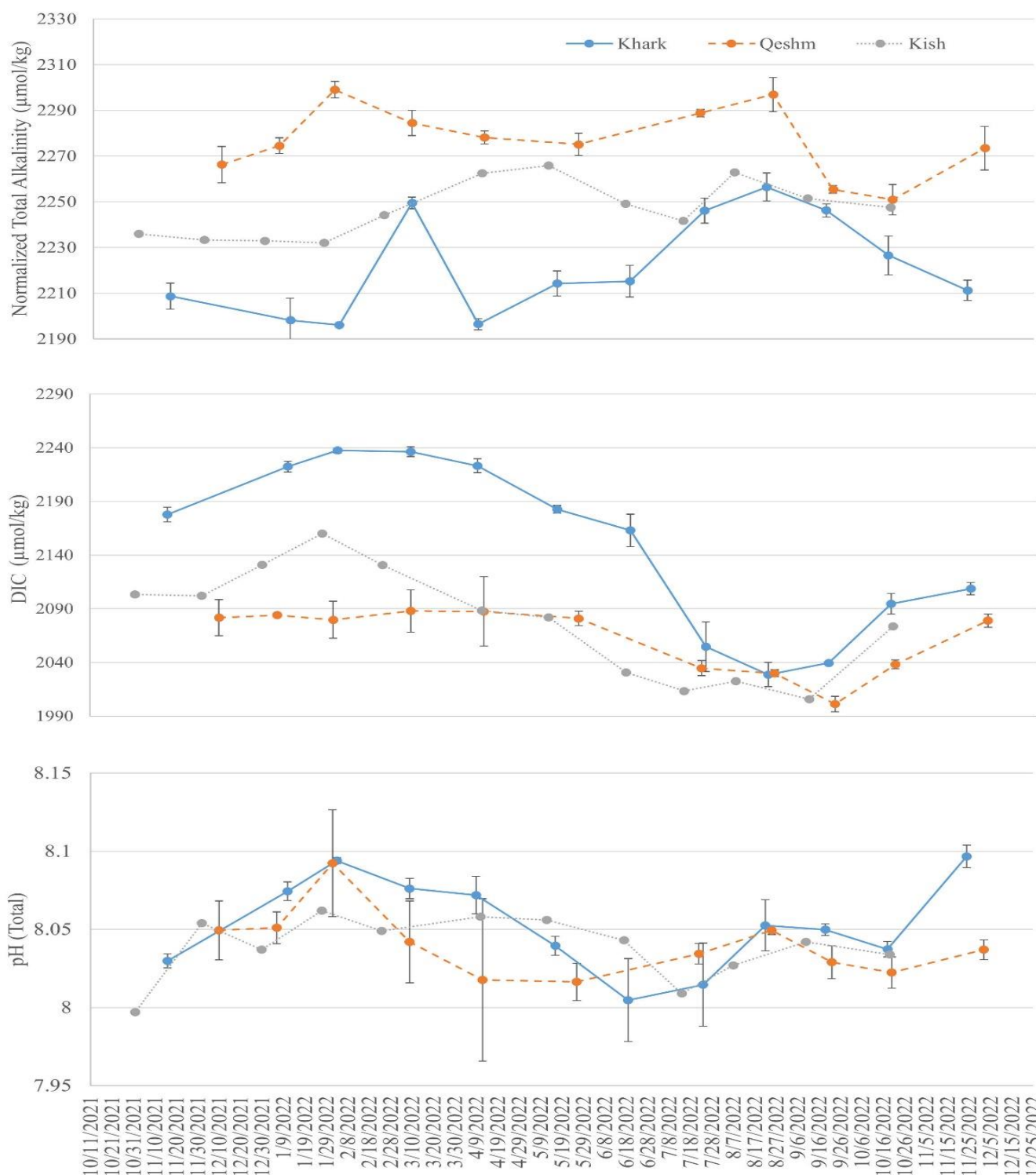
آبسنگ های مرجانی جزیره قشم، بر خلاف نواحی مرکزی و غربی خلیج فارس، کمترین میانگین شوری در زمستان و بیشترین شوری ها در اواخر تابستان و پاییز مشاهده شد. از میان مناطق مورد مطالعه میانگین شوری سالانه از شرق به غرب افزایش نشان می دهد (قسمت کیش > خارک).

قلیائیت کل

میانگین قلیائیت کل اندازه گیری شده در منطقه مرجانی جزایر خارک و خارگو $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 35,7)$ ۲۵۳۴,۳ و در گستره ۲۴۷۲,۸ تا ۲۵۷۳,۰ به دست آمد. مشابه روند مشاهده شده در مورد شوری، بیشینه قلیائیت کل در ماه های سرد سال و کمینه قلیائیت کل در ماه جولای (آغاز فصل گرم) مشاهده شد (شکل ۲). در آب های اطراف جزیره کیش میانگین قلیائیت کل $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 28,8)$ ۲۴۵۵,۶ در گستره ۲۴۱۴,۵ تا ۲۴۹۹,۸ ثبت شد. بیشینه قلیائیت کل در اواخر ژانویه و کمینه آن در ماه جولای مشاهده شد. میانگین قلیائیت کل در منطقه مورد مطالعه در قشم $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 13,7)$ ۲۴۲۰,۸ در گستره ۲۴۰۶,۳ تا ۲۴۴۵,۷ به دست آمد. با توجه به پایستار بودن ویژگی قلیائیت کل، همانطور که انتظار می رفت، الگوی تغییرات آن در هر منطقه تابع تغییرات شوری بود و از شرق به غرب روند افزایشی نشان داد.

قلیائیت کل نرمال شده

میانگین قلیائیت کل نرمال شده به شوری ۳۵ در مناطق مرجانی جزایر خارک و خارگو $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 22,2)$ ۲۲۲۲,۱ در گستره ۲۱۹۶ تا ۲۲۵۶,۵ ثبت شد. به نظر می رسد در ماه های سرد سال قلیائیت کل نرمال شده در آب های اطراف این جزایر کمتر از تابستان است (شکل ۳). انحراف کاهشی قلیائیت کل نرمال شده از مقدار تقریبی ۲۲۹۵ میکرومول بر کیلوگرم (مقدار میانگین آب های سطحی دریای عمان و شمال اقیانوس هند) نشان دهنده از دست رفتن قلیائیت توده های آب در محیط های دریایی نیمه بسته و عمدتاً کم عمق با تبادل محدود است. از دست رفتن قلیائیت عمدتاً تحت فرآیند ترسیب کلسیم کربنات (زیستی و شیمیایی) و تنفس باکتریایی رخ می دهد. هرچه زمان ماندگاری آب در محیط نیمه بسته ای مانند خلیج فارس بیشتر باشد، زمان بیشتری برای کاهش قلیائیت کل نرمال فراهم می شود. با توجه به اینکه در محاسبه قلیائیت کل نرمال (در شوری معین ۳۵) اثر رقیق شدن توسط بارش و تغلیظ توسط تبخیر، حذف می شود، این فاکتور معیار مناسبی برای ارزیابی میزان و نوع فعالیت های بیوژئوشیمیایی حاکم بر آن محیط آبی است. میانگین قلیائیت کل نرمال در مناطق مرجانی جزیره کیش $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 12,2)$ ۲۲۴۶,۶ در گستره ۲۲۳۲ تا ۲۲۶۵,۸ ثبت شد. میانگین قلیائیت کل نرمال در مناطق مرجانی جزیره قشم $\mu\text{mol/kg}$ $(\pm 15,4)$ ۲۲۷۶,۶ در گستره ۲۲۵۰,۹ تا ۲۲۹۹ ثبت شد. به این ترتیب، آب های اطراف جزایر خارک و خارگو بیشترین مقدار علامت از دست دادن کربنات را نسبت به تنگه هرمز نشان می دهند در حالیکه در آب های اطراف جزیره قشم، به دلیل نزدیکی به تنگه هرمز، حذف کلسیم کربنات کمتری رخ داده است (شکل ۳).



شکل ۳: نمودارهای تغییرات کلیایی کل نرمال شده در شوری ۳۵ (میکرومول بر کیلوگرم)، کربن معدنی محلول (DIC، میکرومول بر کیلوگرم) و pH در ماه های مختلف سال در مناطق مرجانی خارک (خط آبی)، کیش (نقطه چین خاکستری) و قشم (خط چین نارنجی)، از ماه نوامبر ۲۰۲۱ تا ماه دسامبر ۲۰۲۲.

آمد. میانگین pCO_2 در آب های مناطق مرجانی جزیره قشم $22 \mu\text{atm}$ (± 413) در گستره ۳۹۷ تا ۴۶۹ به دست آمد. با توجه به مقادیر انحراف استاندارد هر یک از میانگین ها به نظر می رسد که تفاوت معنی داری از

بنابراین به نظر می رسد آب های منطقه مرجانی خارک و خارگو به طور میانگین در تعادل با اتمسفر بوده اند. میانگین pCO_2 در آب های مناطق مرجانی جزیره کیش $16 \mu\text{atm}$ (± 41) در گستره ۳۹۷ تا ۴۶۹ به دست

سال، با کاهش غلظت هیدروژن کربنات و افزایش جزئی غلظت یون هیدروژن، مقدار SIR به کمینه سالانه خود در ماه جولای می‌رسد. چنین رفتار فصلی در مناطق مرجانی کیش و قشم نیز مشاهده می‌شود (شکل ۴). میانگین SIR در آب‌های مناطق مرجانی جزیره کیش $0.198 (\pm 0.014)$ mol/ μ mol در آب‌های مناطق مرجانی جزیره قشم $0.198 (\pm 0.013)$ mol/ μ mol در آب‌های مناطق مرجانی جزیره قشم $0.198 (\pm 0.013)$ mol/ μ mol در گستره ۰،۱۷۶ تا ۰،۲۰۰ به دست آمد. میانگین SIR در گستره ۰،۱۸۳ تا ۰،۲۲۸ به دست آمد. مقدار میانگین سالانه SIR در خارک و خارگو به طور جزئی از جزایر کیش و قشم بیشتر است. بر اساس متغیر SIR به نظر می‌رسد فصل زمستان آب شرایط بهتری برای کلسیفیکاسیون زیست‌مندان خلیج فارس فراهم می‌کند. در میان مناطق مورد مطالعه نیز آبنسنگ‌های مرجانی جزایر خارک و خارگو از آب‌های با کیفیت بهتری از نظر شیمی کربنات بهره‌مند می‌شوند.

سامانه کربنات در آب‌های مناطق مرجانی خلیج فارس

ترسیب کلسیم کربنات

خلیج فارس به‌عنوان یکی از پهنه‌های شاخص رسوب‌گذاری کلسیم کربنات شناخته می‌شود [۱۸]. به‌جز سواحل ایران که سهم کربنات در رسوبات سطحی آن‌ها حدود ۱۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است [۲۶]، رسوبات بستر این حوضه عموماً بیش از ۵۰ درصد و در نواحی کم‌عمق مجاور شبه‌جزیره عربستان حتی تا حدود ۸۰ درصد ترکیبات کربنات دارند. ارتباط مثبت بین درصد کربنات و اندازه دانه‌ها نشان می‌دهد که افزون بر منابع قاره‌ای و رسوبات بازمانده، تولید زیستی مهم‌ترین منبع کربنات رسوبات است [۲۶] و در این میان، نرم‌تنان بیشترین سهم را داشته و پس از آن جلبک‌های آهکی، مرجان‌ها، روزنه‌داران، بریوزوآها و خارپوستان بخش عمده مواد اسکلتی سازنده رسوبات هولوسن خلیج فارس را فراهم می‌کنند [۲۷]. همچنین در برخی پهنه‌های کم‌عمق جنوبی، رسوب‌گذاری فعال آراگونیت در نواحی شنی بین‌جزرومدی، در اثر تبخیر شدید آب دریا، گزارش شده است [۲۸].

Dyrssen و Brewer نشان دادند آب‌های ورودی از تنگه هرمز نسبت به روند معمول رابطه کلیاییت کل-شوری (AT-S) در آب‌های سطحی اقیانوس هند انحراف داشته و حدود ۱۲۵ میکرومول بر کیلوگرم کاهش کلیاییت (معادل ۶۲،۵ میکرومول CaCO_3 در کیلوگرم) را در شوری مشابه نشان می‌دهند (داده‌های زمستان ۱۹۷۷) [۱۸]. این افت کلیاییت عمدتاً به ترسیب کلسیم کربنات در بستر خلیج فارس و به‌ویژه کلسیفیکاسیون زیستی گسترده در این حوضه نسبت داده شده است. روند AT-S مشاهده‌شده در داده‌های ما، به‌طور مشابه حذف قابل‌توجه CaCO_3 را در نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از خلیج فارس نشان می‌دهد.

نظر میانگین فشار کربن دی‌اکسید آب بین مناطق مرجانی مورد مطالعه دیده نمی‌شود (شکل ۴). در همه سایت‌های مورد مطالعه، در زمانهایی از سال، آب دریا می‌تواند به عنوان سینک کربن دی‌اکسید اتمسفری عمل کند (اگر pCO_2 در آب کمتر از مقدار اتمسفری باشد)، مانند قشم و خارک و خارگو در ماه ژانویه، و در زمان‌هایی از سال آب دریا می‌تواند به عنوان منبع نشر کربن دی‌اکسید به اتمسفر باشد (اگر pCO_2 در آب بیشتر از مقدار اتمسفری باشد)، مانند خارک و خارگو در ژوئن، قشم در آوریل و کیش در ماه اکتبر.

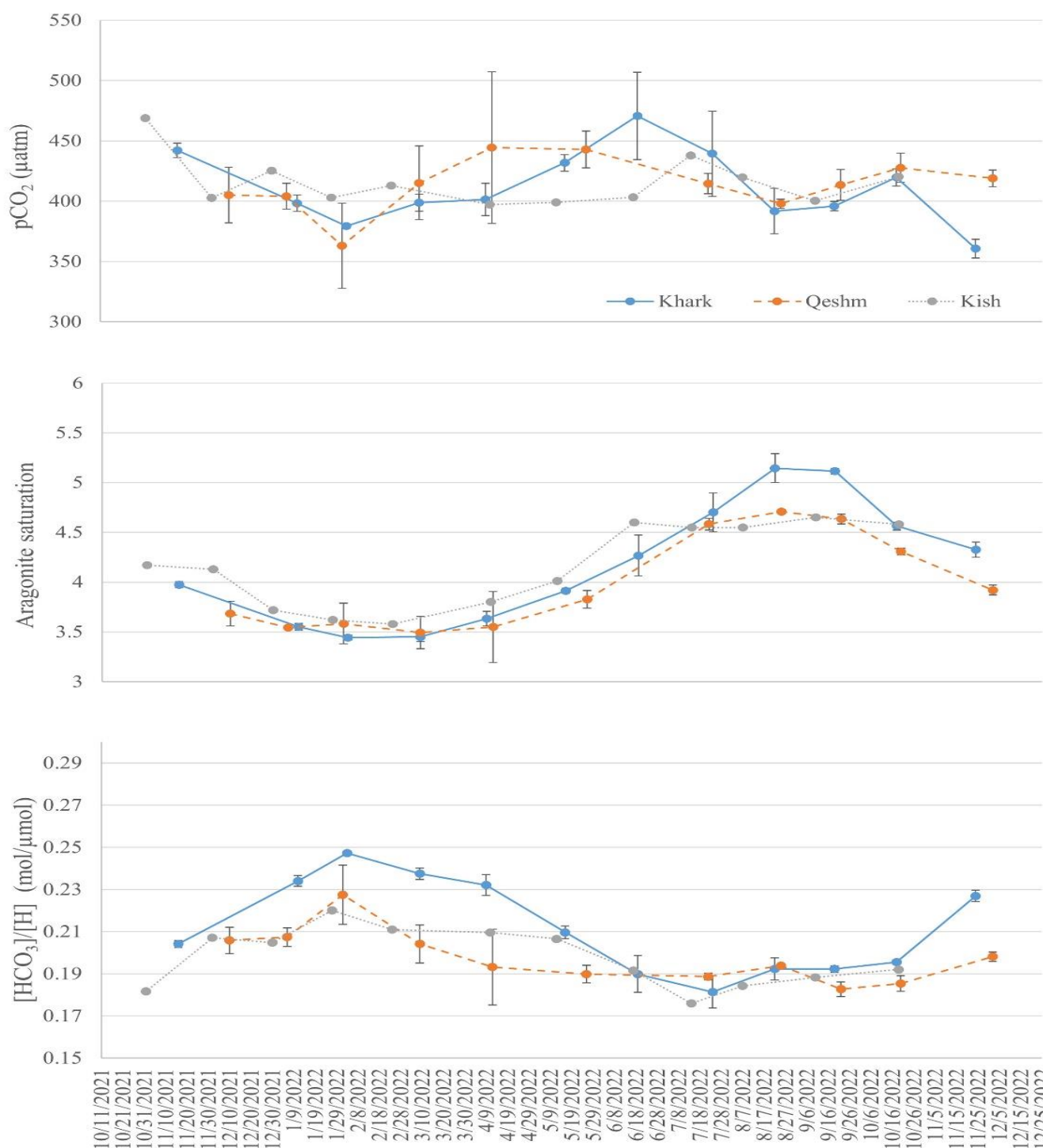
اشباع آراگونیت

"اشباع آراگونیت"، کمیتی محاسباتی است که با استفاده از معادلات شیمی کربنات آب دریا‌های آزاد و با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده مانند کلیاییت کل، pH، شوری، دما و عمق محاسبه می‌شود. اشباع آراگونیت نشان‌دهنده میزان اشباع بودن آب دریا نسبت به کلسیم کربنات در فرم بلوری آراگونیت (مانند اسکلت‌های مرجانی) است. مقدار کمتر از یک به معنی عدم اشباع، و مقادیر بیشتر از یک به معنی فوق‌اشباع بودن آب دریا نسبت به آراگونیت است. میانگین اشباع آراگونیت در آب‌های مناطق مرجانی جزایر خارک و خارگو $4.17 (\pm 0.61)$ در گستره ۳،۴۴ تا ۵،۱۴ ثبت شد. میانگین اشباع آراگونیت در آب‌های مناطق مرجانی جزیره کیش $4.16 (\pm 0.41)$ در گستره ۳،۵۸ تا ۴،۶۵ به دست آمد. میانگین اشباع آراگونیت در منطقه مرجانی جزیره قشم $3.98 (\pm 0.48)$ در گستره ۳،۴۹ تا ۴،۷۱ ثبت شد. شکل (۴) نشان می‌دهد، اشباع آراگونیت، در فصول گرم بیشتر از فصول سرد سال است. در ماه‌های گرم سال، شرایط آب دریا در منطقه مورد مطالعه از نظر شیمیایی مطلوبیت بیشتری برای ترسیب کلسیم کربنات دارد. آب‌های اطراف جزایر خارک و خارگو در تابستان بیشترین مقدار اشباع آراگونیت (۵،۱۴) را در میان مکان‌ها و زمان‌های مورد بررسی نشان می‌دهند. تاثیر مستقیم دما بر غلظت یون‌های کربنات در آب دریا، باعث افزایش میزان فوق‌اشباع کانی آراگونیت در آب دریا می‌شود.

نسبت هیدروژن کربنات به یون هیدروژن

یکی از شاخص‌های شیمیایی تاثیرگذار بر نرخ کلسیفیکاسیون موجودات دریایی، نسبت غلظت یون‌های هیدروژن کربنات به غلظت یون‌های هیدروژن در آب دریا است ($[\text{HCO}_3^-]/[\text{H}^+]$). این نسبت که در متون اکوفیزیولوژیک جانوران دریایی به نسبت سوستر^۱ به بازدارنده (SIR^1) نیز معروف است، هرچه بزرگتر باشد شرایط برای موجودات سازنده ساختارهای کربنات مطلوب‌تر است [۱۲، ۲۴ و ۲۵]. میانگین نسبت SIR در آب‌های منطقه مرجانی جزایر خارک و خارگو $0.212 (\pm 0.022)$ mol/ μ mol در گستره ۰،۱۸۱ تا ۰،۲۴۷ به دست آمد. بر خلاف فاکتور اشباع آراگونیت، بیشترین مقدار SIR در فصل سرد سال مشاهده می‌شود و در فصل گرم

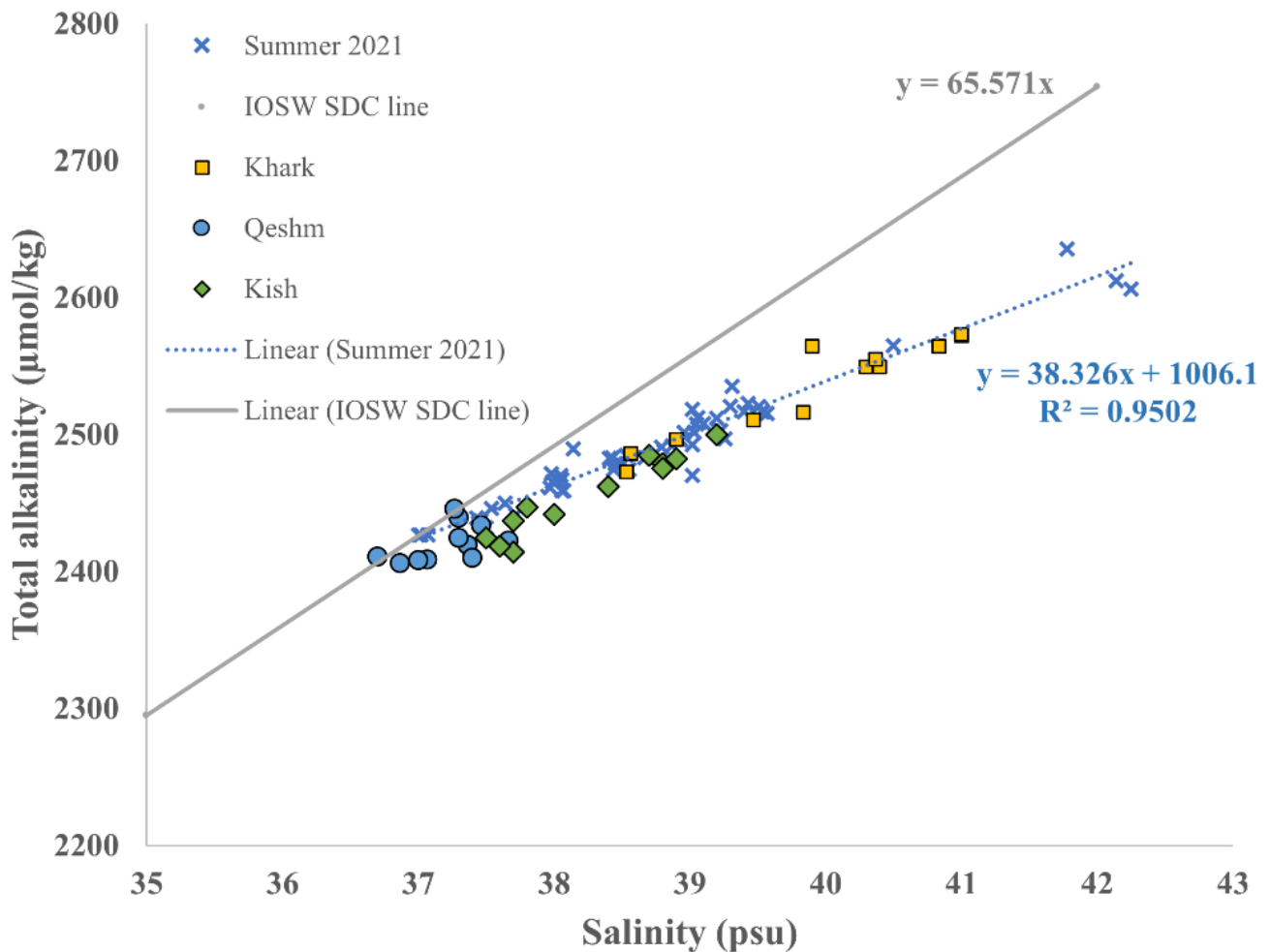
¹ Substrate to inhibitor ratio



شکل ۴: نمودارهای تغییرات فشار جزئی کربن دی اکسید آب (μatm)، حالت اشباع آراگونیت (Ω_{ar}) و نسبت یون هیدروژن کربنات به یون هیدروژن (SIR) در ماه های مختلف سال در مناطق مرجانی خارک (خط آبی)، کیش (نقطه چین خاکستری) و قشم (خط چین نارنجی)، از ماه نوامبر ۲۰۲۱ تا ماه دسامبر ۲۰۲۲

شکل (۵) نشان دهنده رابطه قلیابیت کل و شوری در ۴ دسته از داده های برداشت شده در خلیج فارس است که با روند تغییرات آب های سطحی اقیانوس هند مقایسه شده است (رقیق شدن (بارش) یا تغلیظ (تبخیر) آب های سطحی اقیانوس هند با قلیابیت کل ۲۲۹۵ میکرومول بر کیلوگرم در شوری ۳۵، برگرفته از داده های "مرکز تحلیل اطلاعات کربن دی اکسید" (CDIAC)، [۲۹]). این چهار دسته داده شامل داده های نمونه های ۱۰ متر فوقانی آب های خلیج فارس در منطقه انحصاری اقتصادی ایران در تابستان ۲۰۲۱ (ماه سپتامبر) [۱۵]، و نمونه های سطحی مناطق مرجانی جزایر خارک، کیش و قشم در ماه های مختلف از اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲ هستند

شکل (۵) نشان دهنده رابطه قلیابیت کل و شوری در ۴ دسته از داده های برداشت شده در خلیج فارس است که با روند تغییرات آب های سطحی اقیانوس هند مقایسه شده است (رقیق شدن (بارش) یا تغلیظ (تبخیر) آب های سطحی اقیانوس هند با قلیابیت کل ۲۲۹۵ میکرومول بر کیلوگرم در شوری ۳۵، برگرفته از داده های "مرکز تحلیل اطلاعات کربن دی اکسید"



شکل ۵: توزیع قلیابیت کل (میکرومول بر کیلوگرم) بر حسب شوری (psu) در خلیج فارس. خط خاکستری روند رقیق شدن یا تغلیظ آب های سطحی اقیانوس هند را نشان می دهد (IOSW SDC line) [۲۹]. ضربدر های آبی: نمونه های سطحی (۰-۱۰ متر) خلیج فارس در تابستان ۲۰۲۱، مربع های زرد: نمونه های منطقه مرجانی خارک در ماه های مختلف اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲، لوزی های سبز: نمونه های منطقه مرجانی کیش در ماه های مختلف اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲، دایره های آبی: نمونه های منطقه مرجانی قشم در ماه های مختلف اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲.

بر کیلوگرم) در حالی که آب های منطقه مرجانی جزیره قشم که نزدیک ترین منطقه مورد مطالعه به ورودی تنگه هرمز محسوب می شود، با میانگین کاهش قلیابیت حدود ۲۰ میکرومول بر کیلوگرم در شوری میانگین سالانه ۳۷،۲، کمترین انحراف را از روند IOSW نشان می دهد. آب های منطقه مرجانی جزیره کیش با شوری میانگین سالانه ۳۸،۳ کاهش قلیابیت معادل ۵۳ میکرومول بر کیلوگرم آب دریا را نسبت به IOSW در شوری مشابه تجربه می کند. بر اساس بررسی داده های برداشت شده از خلیج فارس به طور معمول هر جا شوری بیشتری ثبت شده، میزان کاهش قلیابیت نیز به همان نسبت بالا بوده است. بر این اساس می توان این طور نتیجه گیری کرد که آب هایی که مدت بیشتری را در خلیج فارس سپری کرده اند، تحت تاثیر فرایند تبخیر، شوری بیشتری داشته و همزمان به دلیل این که مدت زمان طولانی تری در معرض زیستمدان کربناتی قرار گرفته اند، مقدار بیشتری از کلسیم کربنات محلول خود را در فرایند ترسیب زیستی از دست داده اند (شکل (۶) را ببینید).

بر اساس معادلات به دست آمده از برازش بهترین خط مستقیم بر داده های تابستان ۲۰۲۱ در آب های سطحی خلیج فارس به طور میانگین در شوری ۴۰، حدود ۸۴ میکرومول بر کیلوگرم کاهش قلیابیت در مقایسه با IOSW مشاهده می شود. این مقدار معادل ترسیب ۴۲ میکرومول کلسیم کربنات از هر کیلوگرم از آب دریا است. همان طور که از شکل (۵) دریافت می شود، با افزایش شوری در خلیج فارس میزان قلیابیت از دست رفته نیز افزایش می یابد. پراکندگی داده های جزایر بر روی داده های سطحی همه خلیج فارس نشان می دهد که اگرچه در برخی از مناطق مرجانی مانند خارک و کیش نوسانات شوری و قلیابیت در طول ماه های نمونه برداری نسبتا وسیع است، با این حال این نوسانات و پراکندگی داده ها به شکل مشخصی منطبق با روند کلی A-T-S در خلیج فارس است که انحراف معینی را از روند IOSW نشان می دهد. در این میان آب های اطراف جزایر خارک و خارگو با شوری متوسط سالانه ۳۹،۹ بیشترین مقدار قلیابیت از دست رفته را در میان جزایر مورد بررسی نشان می دهد (کاهش قلیابیت میانگین حدود ۸۴ میکرومول

Salinity	Sampling No.	Khark	Kish	Qeshm
	1	40.40	38.80	37.37
	2	40.83	38.90	37.07
	3	41.00	38.80	36.70
	4	39.90	39.20	36.87
	5	41.00	38.40	37.00
	6	40.30	37.70	37.30
	7	40.37	37.80	37.30
	8	38.53	38.00	37.27
	9	38.57	37.70	37.40
	10	38.90	37.50	37.67
	11	39.47	37.60	37.47
	12	39.83	38.70	
Average	39.93	38.26	37.22	

Total alkalinity	Sampling No.	Khark	Kish	Qeshm
	1	2549.47	2478.70	2419.47
	2	2564.47	2482.10	2408.80
	3	2572.47	2475.30	2410.67
	4	2564.50	2499.80	2406.27
	5	2572.97	2462.10	2408.27
	6	2549.47	2436.90	2424.57
	7	2554.87	2447.10	2439.17
	8	2472.83	2441.80	2445.67
	9	2486.40	2414.50	2410.10
	10	2496.50	2424.50	2422.40
	11	2510.70	2418.80	2433.60
	12	2516.53	2485.10	
Average	2534.26	2455.56	2420.82	

Alkalinity losses	Sampling No.	Khark	Kish	Qeshm
	1	99.6	65.45	30.7
	2	113.02	68.61	21.7
	3	115.94	68.85	-4.21
	4	51.78	70.58	11.12
	5	115.44	55.83	17.86
	6	93.04	35.13	21.23
	7	92.02	31.48	6.63
	8	53.84	49.9	-2.05
	9	42.45	57.53	42.26
	10	54.21	34.41	47.44
	11	77.17	46.67	23.13
	12	95.38	52.5	
Average	83.66	53.08	19.62	

شکل ۶: وضعیت شوری، قلیابیت کل و میزان کاهش قلیابیت در آب های مناطق مرجانی جزایر خارک، کیش و قشم در ماه های مختلف از اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲ میلادی. رنگ سبز: مقادیر کمتر و رنگ قرمز: مقادیر بیشتر را نشان می دهند. تاریخ های نمونه برداری برای هر جزیره در جدول ۱ نشان داده شده است.

Atkinson (۱۹۹۹) نیز مشاهده کردند که سرعت کلسیفیکاسیون *Porites compressa* با کاهش Ω_{ar} کاهش یافت [۳۳]. مطالعات ما در سه جزیره واقع در خلیج فارس نشان داد که آب های اطراف جزایر خارک و خارگو، اگرچه نوسانات زیادی در طول سال نشان می دهند (۳،۴۴-۵،۱۴)، بیشترین میانگین فاکتور Ω_{ar} را به خود اختصاص دادند (شکل ۷). با توجه به وابستگی شدید Ω_{ar} به دما، کمترین مقادیر در فصل زمستان و بیشترین مقادیر در فصل تابستان مشاهده شد. با اختلاف اندکی پس از جزایر خارک و خارگو، جزیره کیش (۳،۵۸-۴،۶۵) نیز میانگین Ω_{ar} بالایی نشان داده در حالی که حالت اشباع آراگونیت در جزیره قشم (۳،۴۹-۴،۷۱) که در قسمت شرقی خلیج فارس واقع شده است، کمترین مقدار میانگین را نشان می دهد. تحت تاثیر دما، در همه جزایر مورد مطالعه و بطور کلی در سراسر خلیج فارس، درجه اشباع آراگونیت در ماه های سرد سال کمتر است. برای

مطلوبیت کربناتی برای زیستمدان

مطالعات متنوعی ارتباط مستقیم میان رشد و توسعه آبنسنگ های مرجانی را با متغیر حالت اشباع کانی کلسیم کربنات نشان داده اند. به عنوان مثال Broecker و Takahashi (۱۹۶۶) سرعت ترسیب کلسیم کربنات در باهاما بانک^۱ را متناسب با درجه اشباع آراگونیت (Ω_{ar}) یافتند [۳۰]. Smith و Pesret (۱۹۷۴) دریافتند که کلسیفیکاسیون مرجان ها در لاگون جزیره فینینگ^۲ به وسیله درجه اشباع کانی کلسیم کربنات کنترل می شود [۳۱]. سرعت کلسیفیکاسیون و اثر Ω_{ar} بر روی آن به وسیله تست های آزمایشگاهی و تحت شرایط کنترل شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. Gattuso و همکارانش (۱۹۹۸) یک افزایش غیر خطی در سرعت کلسیفیکاسیون *Stylophora pistillata* با افزایش Ω_{ar} را مشاهده کردند که در مقادیر بالاتر از ۳،۹ به یک سرعت ثابت رسید [۳۲]. Marubini و

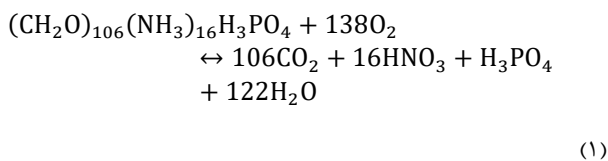
² Fanning Island

¹ Bahama Bank

مقایسه، درجه اشباع آراگونیت در آبسنگ مرجانی دیویس^۱ در دیوار بزرگ مرجانی شرق استرالیا^۲ (۱۸,۸ درجه جنوبی) در سال ۲۰۱۲ در گستره ۲,۹-۴,۱ گزارش شده است [۳۴]. تغییرات ماهانه دما، شوری و قلیائیت کل در این آبسنگ مرجانی به ترتیب برابر با ۲۲,۱-۲۸,۹ درجه سانتی گراد، ۳۴,۹-۳۵,۷ و ۲۲۱۲-۲۳۲۲ میکرومول بر کیلوگرم گزارش شده است. این مقایسه نشان می‌دهد از نظر درجه اشباع آراگونیت، خلیج فارس مطلوبیت بیشتری برای ترسیب کلسیم کربنات از آب دریا در مقایسه با دیوار بزرگ مرجانی استرالیا دارد. بنابراین، موفقیت چشمگیر دیوار بزرگ مرجانی شرق استرالیا در تشکیل و توسعه ساختارهای عظیم مرجانی در مقایسه با خلیج فارس را باید در سایر عوامل محیطی و مطلوبیت زیستگاه جستجو کرد (دما، نور، جریان‌ها، کدورت، غذا و مواد مغذی، آلودگی، استرس‌های انسان زاد و ...). اندازه گیری‌های قبلی در آب‌های منطقه مرجانی جزیره هنگام، در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ در نزدیکی جزیره قشم، مقادیر Ω_{ar} در گستره ۳,۳-۴,۸ را نشان می‌دهد [۱۶] که مشابهت زیادی با اندازه گیری‌های جزیره قشم نشان می‌دهد. اندازه گیری Ω_{ar} در سپتامبر ۲۰۱۶ در آب‌های اطراف جزیره خارگو و جزیره لارک، در نزدیکی قشم، نیز به ترتیب برابر با ۴,۶ و ۴,۹ گزارش شده است [۱۶].

مقایسه SIR (مول بر میکرومول) به عنوان یکی دیگر از شاخص‌های کیفیت شیمی کربنات آب در مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد تفاوت چندانی میان جزایر قشم، کیش و خارک وجود ندارد و اگر تفاوت اندکی دیده می‌شود، همجهت با تفاوت مشاهده شده در Ω_{ar} است. به عبارت دیگر، جزیره خارک به طور میانگین وضعیت اندکی مطلوب‌تر از جزایر کیش و قشم را نشان می‌دهد. تفاوت اصلی میان روند‌های SIR و Ω_{ar} در تغییرات ماهانه آنها در مناطق مورد بررسی است. همانطور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود، بر خلاف Ω_{ar} که در ماه‌های گرم سال وضعیت مطلوب‌تری را نشان می‌دهد، SIR در ماه‌های سرد سال وضعیت بهتری را در سه جزیره نمایش می‌دهد. با توجه به مطالعات اکوفیزیولوژیک انجام شده بر موجودات دریایی که از ساختارهای کلسیم کربنات استفاده می‌کنند و نیز بررسی داده‌های به دست آمده در سایت‌های مرجانی خلیج فارس [۱۶] به نظر می‌رسد در محیط خلیج فارس که همواره نسبت به کلسیم کربنات در حالت فوق اشباع قرار دارد به دلیل نوسانات دمایی نسبتاً زیاد در طول سال، اشباع آراگونیت شاخص ضعیفی برای ارزیابی و تعیین کیفیت فصلی شیمی کربنات برای

تولید زیستی: نسبت فتوسنتز به ترسیب زیستی کلسیم کربنات فرایند فتوسنتز، CO_2 را از آب حذف کرده و DIC را به میزان ۱ مول به ازای هر مول CO_2 کاهش می‌دهد، در حالی که تنفس اثر معکوس دارد. علاوه بر این، فتوسنتز پلانکتونی باعث افزایش جزئی قلیائیت آب دریا شده و AT را به میزان ۱۷ واحد (مصرف ۱۶ مول نیتریک اسید و ۱ مول فسفریک اسید) به ازای حذف ۱۰۶ مول CO_2 افزایش می‌دهد [۳۶]. معادله (۱) رابطه فتوسنتز (به سمت چپ) و تنفس (به سمت راست) را نشان می‌دهد.



بنابراین، فتوسنتز با نسبت استوکیومتری ۱ به ۰,۱۶ باعث کاهش DIC و افزایش AT می‌شود، در حالی که تجزیه ماده آلی این اثر را معکوس می‌کند. ترسیب زیستی کلسیم کربنات، DIC و AT را با نسبت ۱ به ۲ کاهش می‌دهد، در حالی که انحلال کلسیم کربنات باعث افزایش آن‌ها به همان نسبت می‌شود [۳۷]. بنابراین، می‌توانیم از نسبت‌های استوکیومتری برای استخراج معادله (۲) استفاده کنیم:

$$\frac{\Delta NA_T}{\Delta NDIC} = \frac{0.16\Delta OrgC - 2\Delta CaCO_3}{-\Delta OrgC - \Delta CaCO_3} \quad (2)$$

که در آن $\Delta NA_T/\Delta NDIC$ ، که با m نشان داده می‌شود، شیب داده‌های NA_T در برابر $NDIC$ است. $\Delta OrgC$ مقدار مولی کربن آلی تولیدشده در فتوسنتز و $\Delta CaCO_3$ مقدار مولی کربن معدنی رسوب کرده به صورت $CaCO_3$ طی فرآیند ترسیب زیستی کلسیم کربنات است.

² GBR¹ Davies reef

SIR	Sampling No.	Khark	Kish	Qeshm
	1	0.20	0.18	0.21
	2	0.23	0.21	0.21
	3	0.25	0.20	0.23
	4	0.24	0.22	0.20
	5	0.23	0.21	0.19
	6	0.21	0.21	0.19
	7	0.19	0.21	0.19
	8	0.18	0.19	0.19
	9	0.19	0.18	0.18
	10	0.19	0.18	0.19
	11	0.20	0.19	0.20
	12	0.23	0.19	
Average	0.21	0.20	0.20	

Aragonite saturation state	Sampling No.	Khark	Kish	Qeshm
	1	3.97	4.17	3.68
	2	3.55	4.13	3.54
	3	3.44	3.72	3.58
	4	3.45	3.62	3.49
	5	3.63	3.58	3.55
	6	3.91	3.80	3.83
	7	4.27	4.01	4.58
	8	4.70	4.60	4.71
	9	5.14	4.55	4.63
	10	5.11	4.55	4.31
	11	4.56	4.65	3.92
	12	4.33	4.58	
Average	4.17	4.16	3.98	

شکل ۷: وضعیت نسبت هیدروژن کربنات به یون هیدروژن (SIR) (مول بر میکرومول) و میزان اشباع آراگونیت (Ω_{ar}) در آب های مناطق مرجانی جزایر خارک، کیش و قشم در ماه های مختلف از اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲ میلادی. رنگ سبز: مقادیر کمتر و رنگ قرمز: مقادیر بیشتر را نشان می دهند. تاریخ های نمونه برداری برای هر جزیره در جدول ۱ نشان داده شده است.

بر اساس شکل (۸) نحوه توزیع نمونه های سطحی (۰-۱۰ متر) خلیج فارس در فصل تابستان ۲۰۲۱ در فضای $\text{NA}_{\text{T}}-\text{NDIC}$ نشان دهنده تاثیر همزمان ترسیب زیستی کلسیم کربنات و فرآیند فتوسنتز از تنگه هرمز به سمت بخش های درونی خلیج فارس است (نمونه های تنگه هرمز با مقادیر بیشتر قلیابیت کل و کربن معدنی محلول نرمال). شیب پراکندگی داده ها در تابستان (۰,۴۴) نشان می دهد سهم فتوسنتز در مقابل ترسیب زیستی کلسیم کربنات در آب های سطحی خلیج فارس بیشتر است. با استفاده از معادله (۳) و مقدار شیب ۰,۴۴، نسبت کربن آلی تولید شده به کلسیم کربنات ترسیب شده ($\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$) در تابستان معادل ۲,۶ به ۱ است، یعنی به ازای هر مول کلسیم کربنات جامد، ۲,۶ مول کربن آلی از طریق فتوسنتز تولید می شود. به این ترتیب، شیمی کربنات آب های سطحی خلیج فارس در تابستان تحت تاثیر فرآیندهای فتوسنتز و کلسیفیکاسیون به نسبت ۲,۶ به ۱ قرار دارد.

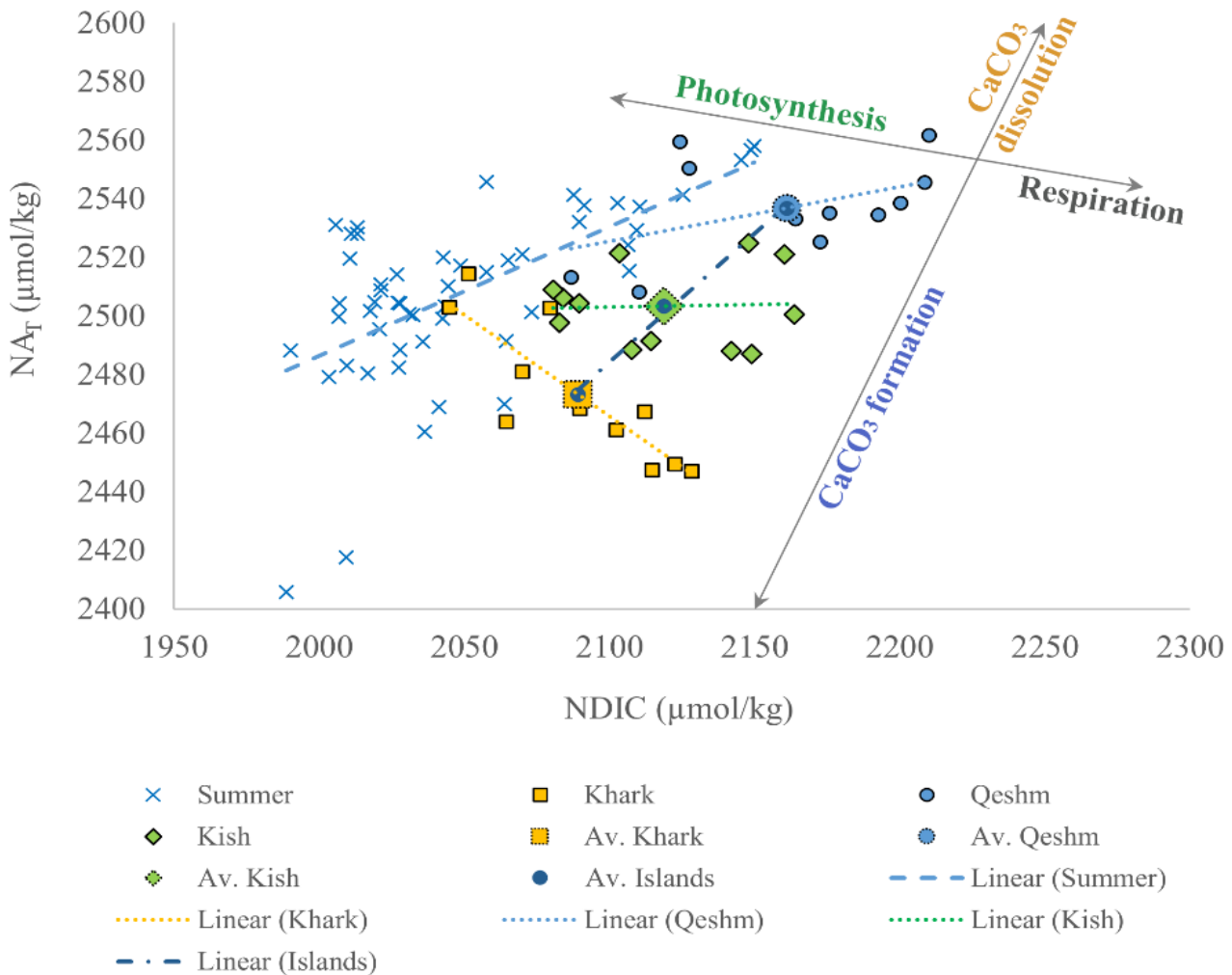
بنابراین، نسبت فتوسنتز-تنفس به ترسیب-انحلال کلسیم کربنات ($\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$) را می توان از معادله (۲) و شیب m در نمودار پراکندگی $\Delta\text{NA}_{\text{T}} - \Delta\text{NDIC}$ محاسبه کرد:

$$\frac{\Delta\text{OrgC}}{\Delta\text{CaCO}_3} = \frac{(2 - m)}{(0.16 + m)} \quad (3)$$

نمودارهای AT-DIC ابزار مؤثری برای بررسی تأثیر فرآیندهای شیمیایی و زیستی بر شیمی کربنات آب دریا هستند. شکل (۸) نمودار داده های قلیابیت کل نرمال (NA_{T}) در مقابل کربن معدنی محلول نرمال (NDIC) در شوری متوسط ۳۹ را نشان می دهد. و تأثیرات نظری فرآیندهایی مانند فتوسنتز، تنفس، تشکیل و انحلال کلسیم کربنات را بر AT و DIC نشان می دهد.

دلیل زمان ماندگاری طولانی تری که در خلیج فارس داشته اند، تاثیرات بیشتری را از فعالیت های فتوسنتزی و کلسیفیکاسیون متحمل شده و قلیابیت نرمال و کربن معدنی محلول نرمال آنها کمترین مقدار میانگین را در میان جزایر نشان می دهد.

بررسی پراکندگی داده های NA_T و $NDIC$ در ایستگاه های ثابت جزایر در ماه های مختلف نیز اطلاعات جالبی در مورد نحوه تغییرات نسبت تاثیر فتوسنتز و تشکیل کلسیم کربنات در سه منطقه مورد بررسی نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت، آب های مناطق مرجانی خارک و خارگو به



شکل ۸: نمودار داده های قلیابیت کل نرمال (NA_T) در مقابل کربن معدنی محلول نرمال ($NDIC$) در شوری متوسط ۳۹. ضربدر های آبی: نمونه های سطحی (۰-۱۰ متر) خلیج فارس در تابستان ۲۰۲۱ [۱۵]. مربع های زرد: نمونه های منطقه مرجانی خارک در ماه های مختلف اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲ (مربع زرد بزرگ: میانگین سالانه خارک)، لوزی های سبز: نمونه های منطقه مرجانی کیش در ماه های مختلف اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲ (لوزی سبز بزرگ: میانگین سالانه کیش)، دایره های آبی: نمونه های منطقه مرجانی قشم در ماه های مختلف اواخر ۲۰۲۱ تا اواخر ۲۰۲۲ (دایره آبی بزرگ: میانگین سالانه قشم). فلش های خاکستری نشان دهنده اثر فرایند هایی مانند فتوسنتز در آب دریا، تشکیل زیستی کانی های کلسیم کربنات از آب دریا، تنفس در آب دریا و انحلال کانی های کربنات در آب دریا است.

کلسیفیکاسیون کمتر را در ماه های گرم و فتوسنتز کمتر و کلسیفیکاسیون بیشتر را در ماه های سرد سال نشان می دهند. پس از جزیره خارک، نمونه های جزیره کیش با فاصله کمتر از تنگه هرمز و با میانگین NA_T و $NDIC$ بیشتر، به طور متوسط در مقایسه با خارک تاثیر کمتری از فتوسنتز و کلسیفیکاسیون را متحمل شده اند. پراکندگی داده های ماهانه در جزیره کیش نیز تا حدودی تغییرات جهت داری را در فضای NA_T - $NDIC$ نشان

از طرفی پراکندگی مشخصی در ماه های سال در داده های این ایستگاه مشاهده می شود. نمونه های ماه های سرد فاصله بیشتری از خط مربوط به داده های گشت دریایی PGE2102 (فصل تابستان) نشان می دهد و در مقابل، نمونه هایی که در ماه های گرم سال از اطراف خارک برداشت شده اند قرابت مشخصی به خط داده های گشت تابستان نشان می دهند. پراکندگی فصلی داده های مربوط به جزیره خارک فتوسنتز بیشتر و

نظر کمی در مطالعات مختلف تفاوت قابل توجهی دارد. به عبارتی دیگر سهم فتوسنتز در مقابل کلسیفیکاسیون (در ازای تبدیل یک مول کربن معدنی محلول به رسوب کلسیم کربنات) در خلیج فارس از مقدار ۰,۷ در اندازه گیری های Brewer و Dyrsson در سال ۱۹۷۷، به ۳,۲۳ در منطقه EEZ قطر در مطالعه ایزومی و همکاران، ۲,۶ در تابستان ۲۰۲۱ در EEZ ایران، ۱,۳۵-۴,۳۵ در منطقه بین جزرومدی و مناطق مرجانی کم عمق شمال خلیج فارس و ۱,۱ در مطالعه ما بصورت میانگین همه ماه های سال بین جزایر مرجانی شرقی، میانی و غربی خلیج فارس افزایش یافته است. اگرچه مقایسه بین داده های تاریخی و داده های جدید در همه موارد افزایش سهم فتوسنتز یا به عبارت دیگر افزایش سهم چرخه کربن آلی را نشان می دهد، ولی این ادعا باید با احتیاط مطرح شود چراکه این مقایسه ها بین مجموعه داده هایی انجام می شود که یا از نظر وسعت منطقه جغرافیایی یا از نظر فصل نمونه برداری بطور کامل منطبق نیستند و بنابراین اظهار نظر در مورد مقدار کمی و دقیق این افزایش سهم با اطلاعات موجود قدری دشوار است. میانگین جهانی نسبت $\Delta\text{OrgC}:\text{CaCO}_3$ در انتقال مواد در لایه بالایی ۱۰۰ متر از ستون آب حدود ۰,۰۶ گزارش شده (معادل نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ برابر با ۱:۱۵) [۳۹]. در اقیانوس هند شمالی (از ۱۵ تا ۴۵ درجه شمالی)، این نسبت حدود $0,027 \pm 0,017$ محاسبه شده (یا نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ برابر با ۱:۳۷) [۳۹]. تحلیل داده های شیمی کربنات از تابستان ۱۹۹۵ در خلیج عمان [۴۰] نشان می دهد که در ۳۰۰ متر بالایی ستون آب، نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ برابر با ۱:۱۸ بوده است. مقایسه این نسبت ها با مقادیر موجود برای خلیج فارس، نشان دهنده مقیاس چشمگیر رسوب گذاری کلسیم کربنات در این منطقه است. اگرچه سهم نسبی تشکیل کلسیم کربنات در حذف کربن نسبت به فتوسنتز از سال ۱۹۷۷ کاهش یافته، اما هنوز هم به طور قابل توجهی بیشتر از میانگین جهانی برای اقیانوس های آزاد است. افزایش سهم فتوسنتز نسبت به تولید کلسیم کربنات در خلیج فارس طی حدود چهار دهه ۷۰ گذشته (۱۹۷۷ تا ۲۰۲۱) می تواند ناشی از عوامل متعددی باشد. یکی از عوامل اصلی ممکن است مرگ و میر گسترده مرجان ها در اثر گرم شدن و توسعه مناطق ساحلی باشد. از سال های ۱۹۹۸/۱۹۹۶، پوشش مرجان های زنده در بسیاری از مناطق خلیج فارس بیش از ۹۰٪ کاهش یافته است، که عمدتاً به دلیل سفیدشدگی و بیماری های ناشی از افزایش دما بوده است [۴۱ و ۴۲]. صخره های مرجانی مکان های اصلی رسوب گذاری کلسیم کربنات در اکوسیستم های دریایی هستند [۴۳]؛ بنابراین، مرگ مرجان ها به همراه گسترش جلبک ها بر سطح آن ها [۴۴]، باعث افزایش فتوسنتز نسبت به تشکیل کلسیم کربنات می شود. همچنین، افزایش DIC در آب های سطحی ناشی از ورودی های جوی، افزایش ورود مواد مغذی به خلیج در اثر توسعه ساحلی [۴۵ و ۴۶]، و/یا تغییرات اقلیمی منطقه ای مانند تضعیف بادهای شمال غربی (شمال) که باعث غنی شدن (افزایش مواد مغذی) خلیج فارس در زمستان می شود [۴۷]، و همچنین افزایش دمای میانگین زمستانی [۴۸] می توانند به صورت مشترک باعث افزایش تولید اولیه و تنفس نزدیک به بستر شوند [۴۷]. با فرض نرخ های پایدار یا کاهش یافته کلسیفیکاسیون در خلیج فارس، افزایش

می دهد بطوری که در نمونه های ماه های گرم سال، مقادیر کمتری از NDIC مشاهده می شود که نشان دهنده تاثیر بیشتر فتوسنتز بر نمونه های نیمه گرم سال است. در نهایت نمونه های جمع آوری شده در آب های منطقه مرجانی جزیره قشم بیشترین نزدیکی را به آب های منطقه تنگه هرمز نشان می دهند. جزیره قشم با بیشترین میانگین NA_T و NDIC از میان جزایر مورد بررسی، کمترین تاثیر را از فرآیندهای زیست-شیمیایی متحمل شده است که با توجه به نزدیکی آن به تنگه هرمز و بهرمندی از آب های تازه دریای عمان، قابل انتظار است. بهترین خطی که از میانگین های NA_T و NDIC مربوط به جزایر مورد بررسی عبور می کند دارای شیب خط ۰,۸۷۵ و ضریب همبستگی ۰,۹۹۵ است. بر اساس شیب این خط می توان مدعی شد که میانگین سالانه روند تغییرات نسبت تاثیر فتوسنتز و ترسیب کلسیم کربنات در آب های جزایر مرجانی مورد بررسی ۱,۱ به ۱ است. یعنی به ازای هر ۱۱ مول کربن آلی تولید شده در فرآیند فتوسنتز، ۱۰ مول کلسیم کربنات تشکیل شده است، چیزی نزدیک به نسبت یک به یک.

با استفاده از داده های NA_T -NDIC زمستان سال ۱۹۷۷ در خلیج فارس، Brewer و Dyrsson (۱۹۸۵) شیبی برابر با ۱,۱۱ با ضریب همبستگی ۰,۹۹۶ گزارش کردند که بر اساس معادله (۳) به نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ برابر با ۰,۷ (یا ۱:۱,۴۲) منتج می شود. این بدان معنی است که در زمستان ۱۹۷۷ به ازای هر ۱,۴۲ مول کلسیم کربنات که توسط زیستمدان خلیج فارس از آب حذف می شده است، یک مول کربن دی اکسید به کربن آلی تبدیل می شده است. این موضوع نشان می دهد که در زمان اندازه گیری های Brewer و Dyrsson در حدود نیم قرن پیش، فرآیند کلسیفیکاسیون در خلیج فارس نسبت به فتوسنتز غالب بوده است. البته باید توجه داشت که گشت دریایی Atlantis II در سال ۱۹۷۷ در همه خلیج فارس انجام شده است و شامل مناطق نسبتاً کم عمق عربی با نرخ ترسیب بالای کلسیم کربنات نیز می شده است [۱۸]. ایزومی و همکاران (۲۰۲۲)، با فرض این که داده های تنگه هرمز از Brewer و Dyrsson (۱۹۸۵) نماینده آب ورودی به خلیج فارس در زمان مطالعه آنها نیز باشد، شیبی برابر با ۰,۳۵ (ضریب همبستگی ۰,۲۰) برای مجموعه داده ترکیبی از منطقه EEZ قطر در دسامبر ۲۰۱۸ و می ۲۰۱۹ گزارش کردند [۳۸]. استفاده از معادله (۳) با شیب ۰,۳۵، نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ برابر با ۳,۲:۱ به دست می دهد. این نتایج نشان می دهد که تولید کربن آلی ناشی از فتوسنتز در دسامبر ۲۰۱۸ و می ۲۰۱۹، ۴,۶ برابر بیشتر از ژانویه-فوریه ۱۹۷۷ به ازای هر مول CO_2 تثبیت شده در قالب CaCO_3 بوده است. اخیراً نسبت های $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ برابر با ۱,۳۵، ۲,۱۳، و ۴,۳۵ به ترتیب برای صخره های مرجانی، آب های ساحلی، و حوضچه های سنگی در شمال خلیج فارس گزارش شده اند، که نشان می دهد تغییرات مکانی در شیمی کربنات در این مناطق ساحلی، بیشتر تحت تاثیر فرآیندهای فتوسنتز-تنفس هستند تا تشکیل-انحلال کلسیم کربنات [۱۶]. در مجموع نتایج به دست آمده از مطالعات جدید در مقایسه با مطالعه انجام شده در سال ۱۹۷۷ حاکی از افزایش سهم فتوسنتز نسبت به ترسیب زیستی کلسیم کربنات است، اگرچه این افزایش سهم از

¹ Exclusive economic zone

مریم محمدی: منابع (پشتیبانی لجستیکی و اجرایی)، گردآوری داده‌ها (همکاری در تعیین ایستگاه‌های نمونه‌برداری)، نگارش - بازبینی و ویرایش.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی (INIOAS) و بنیاد ملی علم ایران (INSF) برای حمایت از انجام این پروژه با کد قرارداد ۹۸۰۲۱۲۶۹ سپاسگزاریم. از آقای احمد عربزاده از مرکز اقیانوس‌شناسی بوشهر برای مشارکت در نمونه برداری های ماهانه این پروژه سپاسگزاریم. داده های جزیره کیش از "برنامه پایش اسیدی شدن دریاهاى ایران" بدست آمد و در این مقاله استفاده گردید. از آقایان اسماعیلی و جبلی از اداره حفاظت محیط زیست سازمان منطقه آزاد کیش که در نمونه برداری های دوهفته ای این برنامه مشارکت داشته اند، سپاسگزاریم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- [1] C. M. Eakin, J. Kleypas, and O. Hoegh-Guldberg, "Global climate change and coral reefs: rising temperatures, acidification and the need for resilient reefs," Status of the Coral Reefs of the World, pp. 29–34, 2008.
- [2] O. Hoegh-Guldberg et al., "Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification," Science (80-.), vol. 318, no. 5857, pp. 1737 LP – 1742, 2007, doi: 10.1126/science.1152509.
- [3] A. P. Charles Sheppard Callum Roberts, "Marine Ecology of the Arabian Region," 1992, Elsevier.
- [4] V. C. John, S. L. Coles, and A. I. Abozed, "Seasonal cycles of temperature, salinity and water masses of the western Arabian Gulf," Oceanol. acta, vol. 13, no. 3, pp. 273–281, 1990.
- [5] J. A. Burt, F. Paparella, N. Al-Mansoori, A. Al-Mansoori, and H. Al-Jailani, "Causes and consequences of the 2017 coral bleaching event in the southern Persian/Arabian Gulf," Coral Reefs, vol. 38, no. 4, pp. 567–589, 2019, doi: 10.1007/s00338-019-01767-y.
- [6] S. Alin et al., "Ocean Acidification and Deoxygenation in the North Pacific Ocean," 2019.
- [7] M. R. Shokri, "Status and Trends of Coral Reefs in the ROPME Sea Area: Past, Present and Future," 2020, Kuwait City, Kuwait: Regional Organization for the Protection of the Marine

تولید اولیه باعث تغییر نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ به نفع کربن آلی شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شیمی کربنات آب‌های مرجانی خلیج فارس تحت تأثیر همزمان فرآیندهای فیزیکی (تبخیر، اختلاط زمستانی، زمان ماند آب) و فرآیندهای زیست‌ژئوشیمیایی (فتوسنتز و کلسیفیکاسیون) قرار دارد. کاهش قلیائیت در مقایسه با آب اقیانوسی ورودی (IOSW)، به‌ویژه در نواحی با شوری بالاتر، بیانگر نقش قابل توجه ترسیب زیستی کلسیم کربنات در تحول سامانه کربنات خلیج فارس است. بیشترین کاهش قلیائیت در آب‌های با زمان ماند طولانی‌تر (خارک و خارگو) و کمترین انحراف از IOSW در نواحی نزدیک به تنگه هرمز (قشم) مشاهده شد که نشان‌دهنده گرادیان مکانی تأثیر فرآیندهای زیستی در امتداد مسیر گردش آب در خلیج فارس است.

مطالعات فاکتورهای شیمیایی موثر بر کلسیفیکاسیون نشان داد با وجود فوق‌اشباع بودن دائمی آب‌های خلیج فارس نسبت به آراگونیت، تغییرات فصلی دما باعث می‌شود که اشباع آراگونیت شاخص حساسی برای ارزیابی کیفیت فصلی شیمی کربنات نباشد. در مقابل، نسبت مولی بی‌کربنات به یون هیدروژن می‌تواند شاخص مناسب‌تری برای ارزیابی شرایط مطلوب کلسیفیکاسیون در مقیاس فصلی باشد.

بررسی نسبت $\Delta\text{OrgC}:\Delta\text{CaCO}_3$ نشان داد که در مقیاس سالانه، سهم فتوسنتز و کلسیفیکاسیون تقریباً هم‌مرتبه و نزدیک به نسبت ۱:۱ است، هرچند در مقایسه با دهه‌های گذشته، سهم نسبی تولید کربن آلی افزایش یافته است. این تغییر می‌تواند ناشی از کاهش ظرفیت کلسیفیکاسیون به دلیل مرگ و تخریب صخره‌های مرجانی، افزایش ورودی مواد مغذی، افزایش DIC اتمسفری و تغییرات اقلیمی منطقه‌ای باشد. چنین روندی، در صورت تداوم، می‌تواند بیانگر تغییر تدریجی ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های مرجانی خلیج فارس باشد. در مجموع، نتایج این مطالعه بر اهمیت پایش بلندمدت و یکپارچه شیمی کربنات، ساختار جامعه زیستی و فرآیندهای تولید و کلسیفیکاسیون در خلیج فارس تأکید دارد؛ زیرا تغییر در تعادل میان تولید کربن آلی و ترسیب کلسیم کربنات می‌تواند پیامدهای عمیقی برای پایداری اکوسیستم‌های مرجانی این پهنه نیمه‌بسته و حساس داشته باشد.

مشارکت نویسندگان

ابوالفضل صالح: مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، تأمین منابع مالی، مدیریت پروژه، گردآوری داده‌ها (تحقیق و بررسی میدانی)، انجام آنالیزهای آزمایشگاهی، تحلیل رسمی داده‌ها، نگارش - پیش‌نویس اولیه، نگارش - بازبینی و ویرایش.

محمد علی حمزه: گردآوری داده‌ها (تحقیق و بررسی میدانی)، نگارش - بازبینی و ویرایش.

داوود جامدی وایقان: انجام آنالیزهای آزمایشگاهی.

- [http://dx.doi.org/10.1016/0079-6611\(85\)90004-7](http://dx.doi.org/10.1016/0079-6611(85)90004-7).
- [19] M. Ghaemi, S. Hamzei, A. Saleh, and S. Gholamipour, "Nutrient regimes in a semi-enclosed marginal sea: The Persian Gulf," *J. Oper. Oceanogr.*, vol. 17, no. 2, pp. 124–136, 2024, doi: 10.1080/1755876X.2024.2333596.
- [20] A. G. Dickson, J. R. Christian, and C. L. Sabine, "Guide to Best Practices for Ocean CO₂ Measurements," 2007, North Pacific Marine Science Organization. [Online]. Available: http://internal-pdf//Guide_all_in_one_for_CO2-1998100480/Guide_all_in_one_for_CO2.pdf
- [21] D. E. L. Pierrot and D. W. R. Wallace, "MS Excel Program Developed for CO₂ System Calculations," 2006, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. doi: 10.3334/CDIAC/otg.CO2SYS_XLS_CDIAC105a.
- [22] ROPME, "Manual of oceanographic observations and pollutant analyses methods (MOOPAM)," 1999, Regional Organization for the Protection of the Marine Environment. [Online]. Available: http://internal-pdf//MOOPAM_4th_Edition-2955530496/MOOPAM_4th_Edition.pdf OP - the University of California
- [23] R. Schlitzer, "Ocean Data View, <https://odv.awi.de/>," 2024.
- [24] L. T. Bach, U. Riebesell, M. A. Gutowska, L. Federwisch, and K. G. Schulz, "A unifying concept of coccolithophore sensitivity to changing carbonate chemistry embedded in an ecological framework," *Prog. Oceanogr.*, vol. 135, pp. 125–138, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.04.012>.
- [25] P. L. Jokiel, C. P. Jury, and K. S. Rodgers, "Coral-algae metabolism and diurnal changes in the CO₂-carbonate system of bulk sea water," *PeerJ*, vol. 2, p. e378, 2014, doi: 10.7717/peerj.378.
- [26] M. A. Hamzeh, "Environmental implications of the distribution and physical characteristics of surface sediments in the northern Persian Gulf," *Geo-Marine Lett.*, vol. 41, no. 4, pp. 1–15, 2021.
- [27] B. H. Purser and E. Seibold, "The Principal Environmental Factors Influencing Holocene Sedimentation and Diagenesis in the Persian Gulf," in *The Persian Gulf*, 1973, pp. 1–9.
- [28] B. D. Evamy, "The Precipitation of Aragonite and Its Alteration to Calcite on the Trucial Coast of the Persian Gulf BT - The Persian Gulf," B. H. Purser, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1973, pp. 329–341.
- [29] Z.-P. Jiang, T. Tyrrell, D. J. Hydes, M. Dai, and S. E. Hartman, [8] A. Saleh and H. Ershadifar, "Decreasing Dissolved Oxygen in the Persian Gulf and the Gulf of Oman: Impacts and Strategies for Mitigation—A Comprehensive Review," *J. Oceanogr.*, vol. 14, no. 56, pp. 47–62, 2024.
- [9] R. Wanninkhof et al., "Ocean acidification along the Gulf Coast and East Coast of the USA," *Cont. Shelf Res.*, vol. 98, pp. 54–71, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.02.008>.
- [10] C. Langdon et al., "Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef," *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 14, no. 2, pp. 639–654, 2000.
- [11] P. L. Jokiel, "Ocean acidification and control of reef coral calcification by boundary layer limitation of proton flux," vol. 87, no. 3. 2011. doi: 10.5343/bms.2010.1107.
- [12] L. T. Bach, "Reconsidering the role of carbonate ion concentration in calcification by marine organisms," *Biogeosciences*, vol. 12, no. 16, pp. 4939–4951, 2015, doi: 10.5194/bg-12-4939-2015.
- [13] A. Saleh, "Past, present and future state of the carbonate system and acidification in Hengam coral reef in the Persian Gulf TT - وضعیت گذشته، حال و آینده شیمی کربنات و اسیدی شدن در - JOC, vol. 11, no. 43, p. 50, 2020, [Online]. Available: <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1553-en.html>
- [14] D. A. Feary et al., "Critical research needs for identifying future changes in Gulf coral reef ecosystems," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 72, no. 2, pp. 406–416, 2013, doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.02.038.
- [15] A. Saleh, H. Ershadifar, M. Ghaemi, D. Jahedi Vaighan, and C.-T. A. Chen, "Carbonate chemistry and CO₂ dynamics in the Persian Gulf," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 214, p. 117804, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117804>.
- [16] A. Saleh, J. Vajed Samiei, F. Amini-Yekta, M. Seyed Hashtroudi, C.-T. A. T. A. Chen, and N. S. Fumani, "The carbonate system on the coral patches and rocky intertidal habitats of the northern Persian Gulf: Implications for ocean acidification studies," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 151, no. September 2019, p. 110834, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110834>.
- [17] A. Saleh et al., "Hypoxia in the Persian Gulf and the Strait of Hormuz," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 167, p. 112354, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112354>.
- [18] P. G. Brewer and D. Dyrssen, "Chemical oceanography of the Persian Gulf," *Prog. Oceanogr.*, vol. 14, pp. 41–55, 1985, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2022.104185>.
- [39] J. L. Sarmiento, J. Dunne, A. Gnanadesikan, R. M. Key, K. Matsumoto, and R. Slater, "A new estimate of the CaCO₃ to organic carbon export ratio," *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 16, no. 4, pp. 12–54, Dec. 2002, doi: <https://doi.org/10.1029/2002GB001919>.
- [40] A. Olsen et al., GLODAPv2.2020 – the second update of GLODAPv2. 2020. doi: 10.5194/essd-2020-165.
- [41] F. Paparella, C. Xu, G. O. Vaughan, and J. A. Burt, "Coral Bleaching in the Persian/Arabian Gulf Is Modulated by Summer Winds," 2019. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00205>
- [42] B. Riegl et al., "Population collapse dynamics in *Acropora downingi*, an Arabian/Persian Gulf ecosystem-engineering coral, linked to rising temperature," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 24, no. 6, pp. 2447–2462, 2018, doi: 10.1111/gcb.14114.
- [43] Z. Steiner, A. V. Turchyn, E. Harpaz, and J. Silverman, "Water chemistry reveals a significant decline in coral calcification rates in the southern Red Sea," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 3615, 2018.
- [44] K. D. Bahr, P. L. Jokiel, and R. J. Toonen, "The unnatural history of Kāneʻohe Bay: coral reef resilience in the face of centuries of anthropogenic impacts.," *PeerJ*, vol. 3, p. e950, 2015, doi: 10.7717/peerj.950.
- [45] O. Linden et al., "State of the marine environment in the ROPME Sea Area.," 1990.
- [46] C. Sheppard et al., "The Gulf: A young sea in decline," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 60, no. 1, pp. 13–38, 2010, doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.10.017.
- [47] Z. Lachkar, M. Mehari, M. Lévy, F. Paparella, and J. A. Burt, "Recent expansion and intensification of hypoxia in the Arabian Gulf and its drivers," *Front. Mar. Sci.*, vol. 9, no. September, 2022, doi: 10.3389/fmars.2022.891378.
- [48] R. Noori et al., "Recent and future trends in sea surface temperature across the Persian Gulf and Gulf of Oman," *PLoS One*, vol. 14, no. 2, pp. 1–19, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0212790.
- "Variability of alkalinity and the alkalinity-salinity relationship in the tropical and subtropical surface ocean," *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 28, no. 7, pp. 729–742, 2014, doi: 10.1002/2013GB004678.
- [30] W. S. Broecker and T. Takahashi, "Calcium carbonate precipitation on the Bahama Banks," *J. Geophys. Res.*, vol. 71, no. 6, pp. 1575–1602, 1966.
- [31] S. V. Smith and F. Pesret, "Processes of carbon dioxide flux in the Fanning Island lagoon," 1974.
- [32] J.-P. Gattuso, M. Frankignoulle, I. Bourge, S. Romaine, and R. W. Buddemeier, "Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification," *Glob. Planet. Change*, vol. 18, no. 1–2, pp. 37–46, 1998.
- [33] F. Marubini and M. Atkinson, "Effects of lowered pH and elevated nitrate on coral calcification," *Mar. Ecol. Ser. - MAR ECOL-PROGR SER*, vol. 188, pp. 117–121, 1999, doi: 10.3354/meps188117.
- [34] R. Albright, C. Langdon, and K. R. N. Anthony, "Dynamics of seawater carbonate chemistry, production, and calcification of a coral reef flat, central Great Barrier Reef," *Biogeosciences*, vol. 10, no. 10, pp. 6747–6758, 2013, doi: 10.5194/bg-10-6747-2013.
- [35] A. J. Fassbender, C. L. Sabine, and K. M. Feifel, "Consideration of coastal carbonate chemistry in understanding biological calcification," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, no. 9, pp. 4467–4476, 2016, doi: 10.1002/2016GL068860.
- [36] C.-T. A. Chen, R. M. Pytkowicz, and E. Olson, "Evaluation of the calcium problem in the South Pacific," *Geochem. J.*, pp. 1–10, 1982, doi: 10.2343/geochemj.16.1.
- [37] D. A. Wolf-Gladrow, R. E. Zeebe, C. Klaas, A. Körtzinger, and A. G. Dickson, "Total alkalinity: The explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes," *Mar. Chem.*, vol. 106, no. 1, pp. 287–300, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.01.006>.
- [38] C. Izumi et al., "Excess pCO₂ and carbonate system geochemistry in surface seawater of the exclusive economic zone of Qatar (Arabian Gulf)," *Mar. Chem.*, vol. 247, p. 104185, 2022, doi:

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

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

✉ saleh@inio.ac.ir

 0000-0003-4795-8737

Hamzeh, M., Marine geology (Associate professor), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

✉ hamzeh@inio.ac.ir

 0000-0002-0868-3366

Jahedi Vaighan, D., Chemistry (MSc), Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

✉ davoudjahedi36@gmail.com



Mohammadi, M., Environmental design engineering (MSc), Environment Department, Kish Free Trade Zone Organization, Kish Island, Iran

✉ K.mmraha@gmail.com



این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:



HOW TO CITE THIS ARTICLE

 <http://doi.org/10.52547/joc.16.64.9>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1897-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.