

وضعیت گذشته، حال و آینده شیمی کربنات و اسیدی شدن در آبسنگ مرجانی هنگام در خلیج فارس

ابوالفضل صالح

پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: saleh@inio.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۷/۴

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۹/۳/۱۲

چکیده

با فرض وقوع سناریوی محتمل پیش رو (ICCP RCP8.5)، تا سال ۲۱۰۰ میلادی، pH آب دریا در آبسنگ مرجانی هنگام در خلیج فارس با کاهش ۰/۴۶ نسبت به سال ۱۸۸۰ به مقدار کمتر از ۷/۷۲ خواهد رسید. مقدار کربن معدنی محلول از $2006 \mu\text{mol/kg}$ به مقدار $2263 \mu\text{mol/kg}$ افزایش خواهد یافت. غلظت یون بی کربنات ۲۴ درصد افزایش و یون کربنات ۵۱ درصد کاهش خواهد یافت. حالت اشباع یا سیرشدگی کلسیم کربنات در آب دریا بیش از ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت که این کاهش احتمالاً منجر به تاثیر کاهشی حدود ۳۸ درصدی در نرخ کلسیفیکاسیون مرجان‌های جزیره هنگام در مقایسه با زمان قبل از انقلاب صنعتی می‌شود. با توجه به اینکه نرخ فرسایش و کلسیفیکاسیون در مرجان‌های خلیج فارس تا حدودی نزدیک به هم است، در انتهای قرن حاضر با کاهش نرخ کلسیفیکاسیون و افزایش سرعت فرسایش مرجان‌ها، احتمالاً، برآیند ناگواری عاید ساختارهای کربناتی مرجانی در خلیج فارس خواهد شد.

کلمات کلیدی: شیمی کربنات، اسیدی شدن، آبسنگ مرجانی، خلیج فارس.

۱. مقدمه

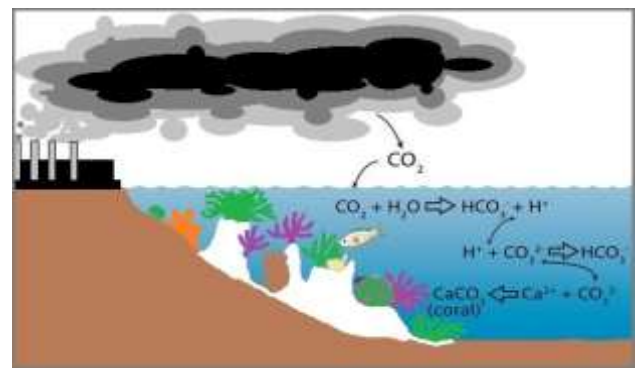
Kleypas and Langdon, 2006; Kroeker et al., 2013; Langdon et al., 2003; Orr et al., 2005) باشد. موجوداتی که از ساختارهای کربنات کلسیمی استفاده می‌کنند حساسیت خاصی به پدیده اسیدی شدن نشان می‌دهند چراکه بقای آنها به شدت وابسته به پارامترهایی مانند حالت اشباع کربنات کلسیم (Ω) (Langdon et al., 2003) و یا نسبت یون بی کربنات به یون هیدروژن (Bach, 2015) تحت تاثیر شیمی کربنات آب است. بوم‌سازگان‌های آبسنگ مرجانی در مناطق گرمسیری و زیر-گرمسیری گسترش داشته و بیشترین سهم را در تنوع زیستی کره زمین دارند. این ساختارهای عظیم زیستی با تامین منابعی برای ماهیگیری، محلی برای گردشگری، حفاظت از سواحل و ارائه ترکیبات شیمیایی دارویی مستقیماً بر روی زیست میلیون‌ها

شیمی کربن معدنی و اسیدیته اقیانوس‌ها و دریاها در مقیاس منطقه‌ای و جهانی به دلیل افزایش غلظت کربن دی‌اکسید اتمسفری در حال تغییر است (شکل ۱). فرایند اسیدی‌تر شدن اقیانوس‌ها (برای راحتی در ادامه از عبارت اسیدی شدن استفاده می‌شود) می‌تواند بسیاری از فرایندهای بیولوژیکی موجودات زنده ساکن دریا را تحت تاثیر قرار دهد. از جمله این تاثیرات می‌تواند بر روی فعالیت‌هایی نظیر بالانس pH، متابولیسم، کلسیمی شدن (کلسیفیکاسیون)، رشد و نمو، تکامل و توان بقا برای بسیاری از موجودات شناورزی (Iglesias-Rodriguez et al., 2008; Riebesell U., 2011) و کفزی (Gazeau et al., 2013) باشد.

بوم‌هایی بودند که در برابر اسیدی شدن اقیانوس‌ها آسیب پذیر شناخته شدند. تخمین زده شده است که ارگانسیم‌های آبسنگ‌ساز اصلی، مرجان‌ها و جلبک‌های آهکی، نسبت به دوران قبل از صنعتی شدن با کاهش کلسیفیکاسیون ده تا پنجاه درصدی تا اواسط قرن حاضر مواجه خواهند بود. این پدیده به طور قطع بوم سازگان‌های مرتبط با آنها را تحت تاثیر قرار خواهد داد. اسیدی شدن اقیانوس‌ها باعث کم‌رنگ شدن فعالیت ارگانسیم‌های آبسنگ‌ساز و در نتیجه از بین رفتن مزیت‌های حاصل از آبسنگ‌های متعلق به آنها می‌گردد. آبسنگ‌های مرجانی به عنوان بوم سازگان‌های پیچیده حامی تنوع زیستی بوده و در برخی مناطق به عنوان سدی محافظ، مناطق امنی را برای بوم‌سازگان‌های حساس ساحلی مانند جنگل‌های مانگرو و بستر علف‌های دریایی فراهم می‌آورد.

چندین مکانیسم برای توضیح دلیل اثرگذاری تغییر غلظت CO_2 آب دریا بر روی سرعت کلسیفیکاسیون مرجان‌ها بیان شده است. Holcomb و Cohen (۲۰۰۹) نشان داده‌اند که مرجان‌ها حالت اشباعیت زیادی را در سایت‌های کلسیفیکاسیون خود با صرف انرژی ایجاد می‌کنند ولی در pH های کم (در اثر اسیدی شدن) این کار مستلزم صرف انرژی زیادی است که مرجان‌ها در حال حاضر قادر به جبران آن نیستند. در این راستا فرضیه شار پروتون بر این است که افزایش غلظت یون هیدروژن (اسیدی شدن) در آب دریا باعث محدودیت در انتشار به بیرون یون هیدروژن از لایه مرزی (احاطه کننده) مرجان می‌شود (Jokiel 2011). این فرضیه نسبت $[\text{DIC}]:[\text{H}^+]$ (نسبت مواد اولیه به یون تولیدی در کلسیفیکاسیون) را پارامتری معنادار از لحاظ فیزیولوژیک دانسته و آن را جایگزینی برای حالت اشباع کانی آراگونیت (Ω_{Ar}) می‌داند (Jokiel 2014). در مطالعات دیگری از همین جنس Bach در مورد نسبت غلظت یون بی کربنات به غلظت پروتون به عنوان عامل موثر در کلسیفیکاسیون مرجان‌ها سخن می‌گوید (Bach 2015). بر اساس این نظریه میزان کلسیفیکاسیون زیستی (ترسیب زیستی کلسیم کربنات) وابسته به غلظت یون‌های Ca^{2+} و یون‌های بی‌کربنات (HCO_3^-) است و در مقابل، غلظت بالای یون‌های هیدروژن ($[\text{H}^+]$) می‌تواند مانعی برای انجام کلسیفیکاسیون باشد (Bach, 2015; Bach et al., 2011; Jokiel et al., 2014; Jokiel, 2011). قابل توجه است که $[\text{HCO}_3^-]:[\text{H}^+]$ در شرایط فشار، دما و شوری ثابت ارتباط خطی کاملی با Ω دارد.

انسان اثرگذارند (Eakin et al. 2008). بطور کلی فعالیت‌های محلی و منطقه‌ای انسان از قبیل صیادی بیش از اندازه، آلودگی و یوتروفیکاسیون و همچنین اختلالاتی از قبیل طوفان‌های شدید و بیماری‌ها اثراتی منفی بر آبسنگ‌های مرجانی داشته‌اند. در مقیاس جهانی، تغییرات اقلیم با افزایش دادن میزان دما و اسیدیته آب دریا، فرکانس و شدت طوفان‌ها، میزان تابش‌های ماورای بنفش و شیوع بیماری، از مهمترین عوامل تهدیدکننده سلامت آبسنگ‌های مرجانی بشمار می‌رود (Hoegh-Guldberg et al. 2007).



شکل ۱: شمایی از نحوه تاثیر افزایش غلظت گاز کربن دی‌اکسید اتمسفری بر شیمی کربنات در آب دریا

در خلیج فارس لکه‌های مرجانی بصورت حاشیه‌ای در اطراف برخی جزایر و سواحل پراکنش دارند. علاوه بر ارزش و اهمیت بوم‌شناختی لکه‌های مرجانی خلیج فارس، این مناطق با ارئه غذا و درآمد به بومیان، سودرسانی تفریحی، پژوهشی و آموزشی به جوامع مرتبط، دفع ضایعات و حفاظت از سواحل به عنوان بوم‌سازگان‌هایی با ارزش اقتصادی بالا شناخته می‌شوند (Madani et al., 2012). با این وجود، این زیستگاه‌ها نه تنها توسط تغییرات اقلیمی، بلکه بوسیله‌ی عوامل استرس‌زای محلی شامل آلودگی‌های نفتی، ساخت موج‌شکن، رسوب ناشی از لایروبی، شکار جانداران زینتی، آسیب گسترده توسط لنگر قایق‌ها و لنج‌ها و تخلیه مواد مغذی و فاضلاب تهدید می‌شوند (Maghsoudlou et al., 2008). بطور کلی، عوامل متعددی بر سلامت و پویایی اجتماعات مرجانی موثرند که از میان آنها میزان دما، نور، رسوبات معلق و رسوب‌گذاری، مواد مغذی، وضعیت جریان‌ها و شیمی کربنات آب دریا (تعیین کننده میزان اسیدیته) از اهمیت بیشتری برخوردارند. آبسنگ‌های مرجانی از جمله اولین زیست

با استفاده از نرم‌افزار CO2sys-xls (Pierrot et al., 2006) سایر پارامترهای سیستم کربنات آب دریا مانند کربن معدنی کل (TCO_2)، pH (مقیاس یون هیدروژن کل)، غلظت کربنات، بی-کربنات، گاز دی-اکسید کربن، حالت اشباع آراگونیت (Ω_{Ar}) محاسبه شدند. با استفاده از داده‌های جهانی مربوط به دما و غلظت کربن دی‌اکسید اتمسفری حاصل از اندازه‌گیری‌های گذشته و پیش‌بینی مدل‌ها (IPCC 2014, Collins et al., 2013) تخمینی از مقادیر گذشته و آینده دما و غلظت کربن دی‌اکسید اتمسفری در سایت مرجانی جزیره هنگام در دو حالت مختلف الف و ب در نظر گرفته شد. فرضیات و تقریب‌های در نظر گرفته شده برای بازسازی و پیش‌بینی شیمی کربنات در سایت مرجانی جزیره هنگام عبارتند از:

الف- میزان افزایش دما در آب‌های کم عمق جزیره مرجانی هنگام تا سال ۲۱۰۰ تقریباً هم مقدار و همسو با نرخ افزایش دمای میانگین مناطق مرجانی باشد. در مطالعه‌ای جدید با بررسی داده‌های ماهواره‌ای از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۷ در ۱۶۷۰ منطقه مرجانی در حد فاصل ۳۰ درجه شمالی و جنوبی، میانگین افزایش دما در مقیاسه با افزایش دمای جهانی (خشکی و اقیانوس)، ۷۱ درصد گزارش شده است (Lough et al., 2018). با فرض برقراری این شرایط برای سایت مرجانی منتخب مقادیر دما بازسازی و محاسبات انجام شد (جدول ۱).

ب- با فرض اینکه افزایش دمای سایت منتخب (جزیره هنگام) با نرخ محاسبه شده با داده‌های ماهواره‌ای (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۹ در جزیره هنگام) در مقیاسه با نرخ جهانی تا انتهای قرن بیست و یکم ثابت باشد (افزایش دما با نسبت ۵ درصد نسبت به افزایش جهانی). با فرض برقراری این شرایط برای سایت مرجانی منتخب، مقادیر دما بازسازی و محاسبات انجام شد (جدول ۲).

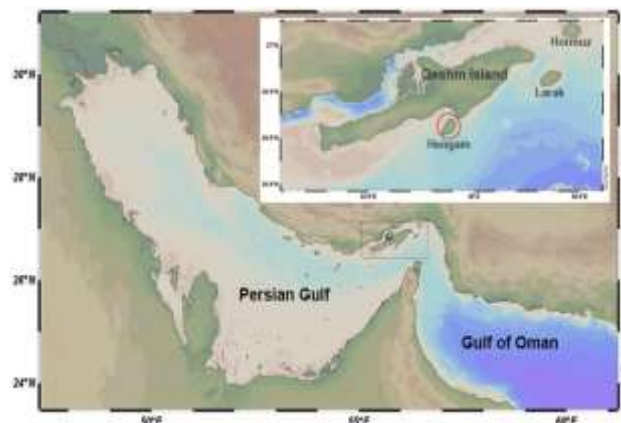
بقیه فرضیات برای دو حالت الف و ب مشترک است:

- غلظت کربن دی‌اکسید اتمسفری در خلیج فارس مشابه با مقادیر متوسط جهانی افزایش یابد.
- فشار جزئی کربن دی‌اکسید در آب در سایت مرجانی جزیره هنگام در تعادل با مقادیر اتمسفری باشد.
- قلیابیت و شوری کل تغییر قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه از زمان قبل از صنعتی شدن تا ۲۱۰۰ نشان نمی‌دهد (با توجه به عملکرد دو اثر معکوس تبخیر بیشتر و افزایش تراز آب دریاها) (Jiang et al., 2019).

بر اساس مراجع مورد استفاده در اندازه‌گیری‌های کربن دی-اکسید اقیانوسی (Dickson and Christian, 2007)، با استفاده از دو پارامتر از چهار پارامتر اصلی و قابل اندازه‌گیری شیمی کربنات (یعنی: قلیابیت کل (A_T)، کربن معدنی محلول کل (TCO_2) یا C_T)، فشار جزئی کربن دی‌اکسید در آب دریا (pCO_2) و pH (در مقیاس‌های یون هیدروژن کل یا هیدروژن آزاد)) و دانستن مقادیر دما، شوری و عمق مورد نظر، می‌توان شیمی کربنات آب دریای آزاد را در هر زمان و مکانی محاسبه و توصیف کرد. با علم به این موضوع و استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و خروجی مدل‌های اقلیمی می‌توان شیمی کربنات را با تقریب قابل قبولی در زمان گذشته (زمان قبل از انقلاب صنعتی در این مطالعه) و آینده (۲۱۰۰ در این مطالعه) در منطقه خلیج فارس نیز بازسازی یا پیش‌بینی کرد. در این مطالعه به بررسی وضعیت گذشته حال و آینده شیمی کربنات در جزیره هنگام به عنوان یک نمونه از سایت‌های مرجانی خلیج فارس می‌پردازیم.

۲. مواد و روش‌ها

از داده‌های شیمی کربنات میانگین گزارش شده برای جزیره هنگام (Saleh et al., 2020) به عنوان مقادیر پایه شوری و قلیابیت کل در محاسبات استفاده شد. با فرض برقرار بودن تعادل میان غلظت کربن دی‌اکسید در اتمسفر و آب دریا (Jiang et al., 2019)، از داده‌های pCO_2 (خروجی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای مختلف) و قلیابیت کل به همراه مقادیر کمکی دما و شوری برای توصیف شیمی کربنات آب دریا در زمان‌های مختلف در آب‌های اطراف جزیره هنگام (شکل ۲) استفاده شد.



شکل ۲: نقشه موقعیت جزیره هنگام در خلیج فارس

جدول ۱: پارامترهای مرتبط با شیمی کربنات محاسبه شده برای زمان قبل از انقلاب صنعتی، ۱۹۷۷، ۲۰۱۶ و ۲۱۰۰ (با سناریوهای مختلف) برای آبرنگ های مرجانی جزیره هنگام در خلیج فارس. نرخ افزایش دما ۷۱٪ نسبت به نرخ جهانی.

	ΔT (°C)	T (°C)	pCO ₂ (μ atm)	pH Total	TCO ₂ (μ mol/kg)	HCO ₃ ⁻ (μ mol/kg)	CO ₃ ²⁻ (μ mol/kg)	Ω_{Ar}	[HCO ₃]/[H] [*] (mol/ μ mol)
Pre-industrial	0	~27.1	280	8.18	2006	1685	314	4.9	0.253
1977	+0.2	~27.5	330	8.12	2043	1744	290	4.6	0.231
2016	+0.6	27.7	400	8.06	2087	1815	261	4.1	0.207
2081-2100 (RCP2.6)	+1.1	~28.2	~450	8.01	2110	1852	247	3.9	0.192
2081-2100 (RCP4.5)	+1.7	~28.8	~650	7.88	2187	1972	199	3.1	0.151
2081-2100 (RCP6)	+2.0	~29.1	~860	7.78	2242	2055	165	2.6	0.124
2081-2100 (RCP8.5)	+3.1	~30.2	>1000	<7.72	>2263	>2085	<153	<2.4	<0.110

A_T=2460 μ mol/kg, Salinity=37.6

*[H⁺] is total hydrogen ion concentration

جدول ۲: پارامترهای مرتبط با شیمی کربنات محاسبه شده برای زمان قبل از انقلاب صنعتی، ۱۹۷۷، ۲۰۱۶ و ۲۱۰۰ (با سناریوهای مختلف) برای آبرنگ های مرجانی جزیره هنگام در خلیج فارس. نرخ افزایش دما ۵٪ نسبت به نرخ جهانی.

	ΔT (°C)	T (°C)	pCO ₂ (μ atm)	pH Total	TCO ₂ (μ mol/kg)	HCO ₃ ⁻ (μ mol/kg)	CO ₃ ²⁻ (μ mol/kg)	Ω_{Ar}	[HCO ₃]/[H] [*] (mol/ μ mol)
Pre-industrial	0	~27.65	280	8.18	2000	1675	317	5.0	0.251
1977	+0.0015	~27.69	330	8.12	2041	1741	291	4.6	0.231
2016	+0.045	27.7	400	8.06	2087	1815	261	4.1	0.207
2081-2100 (RCP2.6)	+0.08	~27.73	~450	8.02	2115	1859	244	3.8	0.193
2081-2100 (RCP4.5)	+0.12	~27.77	~650	7.89	2195	1985	193	3.0	0.152
2081-2100 (RCP6)	+0.14	~27.79	~860	7.78	2251	2070	159	2.5	0.125
2081-2100 (RCP8.5)	+0.215	~27.87	>1000	<7.72	2279	>2111	<142	<2.2	<0.112

A_T=2460 μ mol/kg, Salinity=37.6

*[H⁺] is total hydrogen ion concentration

برای حالت های الف و ب بازسازی و پیش بینی شد، که در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

الف: در این پیش بینی افزایش دمای تا ۳/۱ درجه سانتی گراد تا سال ۲۱۰۰ با فرض حاکم بودن RCP8.5 و رشد ۷۱ درصدی دمای سطحی منطقه مرجانی در قیاس با مقدار جهانی، در نظر گرفته شده است (از زمان قبل از صنعتی شدن). به این معنی که چنانچه تولید کربن دی اکسید اتمسفری مطابق با رویکرد فعلی ادامه یابد و اقدام های پیشگیرانه مناسب برای کاهش تولید CO₂ اتخاذ نگردد، تا دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ دمای سطحی زمین احتمالاً بین ۳/۲ تا ۵/۴ درجه سانتیگراد (میانگین ۴/۳ درجه سانتی گراد) افزایش خواهد یافت. دمای سطحی آب دریا (میانگین سالانه) در آبرنگ مرجانی جزیره هنگام بر اساس داده های ماهواره ای در سال ۲۰۱۶ برابر با ۲۷/۷ درجه سانتی گراد بوده که با فرض ۰/۶ درجه افزایش دمای جهانی از قبل از انقلاب صنعتی، ۲۷/۱ درجه سانتی گراد و با فرض افزایش دمای ۳/۱ درجه ای از زمان انقلاب صنعتی تا ۲۱۰۰ به دمای میانگین سالانه ۳۰/۲ درجه سانتی گراد خواهد رسید. به همین ترتیب غلظت اتمسفری کربن دی اکسید از مقدار ۲۸۰ ppm در زمان قبل از انقلاب صنعتی به مقدار ۳۳۰ ppm در سال ۱۹۷۷، بیش از ۴۰۰ در سال ۲۰۱۶ و مقادیر بیش از ۱۰۰۰ در سال ۲۱۰۰

از بکارگیری غلظت مواد مغذی فسفات و سیلیکات در محاسبات شیمی کربنات به دلیل تاثیر ناچیز آن ها در نتیجه نهایی و نیز به دلیل در دسترس نبودن پیش بینی مقادیر آینده آن ها صرف نظر شد (Jiang et al., 2019). برای ارزیابی روند گرمایش آب در منطقه مرجانی اطراف جزیره هنگام از داده های ماهواره های NOAA استفاده گردید (NOAA coral reef watch, 2019). این داده ها که از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۹ با رزولوشن مکانی ۵ کیلومتر در دسترس هستند، با استفاده از نرم افزار CoastWatch data analysis tool (نسخه ۳,۵,۰,۹۲۴ سال ۲۰۱۹) آنالیز شدند. از نرم افزار xIstat نسخه ۲۰۱۸ برای انجام تست معنی داری روند (Mann-Kendall trend test) استفاده گردید.

۳. نتایج و بحث

با تکیه بر فرضیات مطرح شده در بخش روشها و با در نظر گرفتن میانگین ۲۴۶۰ میکرومول بر کیلوگرم برای میانگین قلیابیت کل و مقدار ۳۷/۶ برای میانگین شوری در آب های اطراف هنگام (Saleh et al., 2020)، پارامترهای اصلی شیمی کربنات آب دریا از زمان قبل از انقلاب صنعتی تا سال ۲۱۰۰

(2010) و تحلیلی که Chan و Connolly بر روی مطالعات منتشر شده تا سال ۲۰۱۲ انجام دادند (مجموعاً ۳۰ مقاله)، منجر به کاهش قابل توجه نرخ کلسیفیکاسیون در مرجان‌ها خواهد شد. بر اساس آنالیز انجام شده توسط Chan و Connolly که در نهایت بر روی ۲۵ مطالعه منتشر شده معتبر انجام شده است، به طور میانگین، به ازای کاهش یک واحدی Ω نرخ کلسیفیکاسیون حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد (Chan and Connolly, 2013). البته نوسانات بین گونه‌ها و مطالعات مختلف زیاد بوده است به طوری که به طور دقیق‌تر می‌توان این کاهش را در محدوده ۱۰ تا ۲۵ درصد در نظر گرفت. با در نظر گرفتن این مدل خطی، به نظر می‌رسد مرجان‌های جزیره هنگام با توجه به اینکه با کاهش Ω به مقدار بیش از ۱/۷ تا سال ۲۱۰۰ روبرو خواهند شد (از مقدار ۴/۱ در سال ۲۰۱۶ به $2/4 <$ در ۲۱۰۰)، احتمالاً کاهشی بیش از ۲۵/۵ درصد در نرخ کلسیفیکاسیون را تجربه خواهند کرد (کاهش ۳۸ درصدی از زمان قبل از صنعتی شدن). بر اساس مطالعه‌ای که توسط تیم تحقیقاتی ما در جزیره هنگام انجام شده است (VajedSamiei et al., 2016) نرخ میانگین سالانه کلسیفیکاسیون سرشاخه‌های مرجان *A. dawning* برابر با حدود $126 \text{ mmol CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ در سال ۲۰۱۴ گزارش شده است ($0/461 \text{ g cm}^{-2} \text{ y}^{-1}$). بر اساس تخمین‌های صورت گرفته، این عدد تحت تاثیر تغییرات آتی شیمی کربنات به مقادیر کمتر از $94 \text{ mmol CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ در سال ۲۱۰۰ خواهد رسید (صرف نظر از اثر سایر عوامل محدود کننده مانند استرس دمایی، آلودگی‌ها، صید بی‌رویه ماهیان مرجانی، یوتروفیکاسیون و...). با در نظر گرفتن پارامتر $\text{[HCO}_3^-]/\text{[H}^+]$ (SIR) که به عنوان فاکتور تاثیرگذار در کلسیفیکاسیون برخی از موجودات زنده دریایی مانند مرجان‌ها، کوکولیتوفورا و دوکفه‌ای‌ها اثبات شده است، نیز مشاهده می‌شود که این پارامتر از زمان قبل از صنعتی شدن تا ۲۱۰۰ احتمالاً با یک کاهش ۵۷ درصدی مواجه خواهد شد، کاهشی که حتی شدیدتر از کاهش مشاهده شده در Ω خواهد بود (همانطور که اشاره شد کاهش در Ω قدری با افزایش دما و تاثیر آن بر ثابت حاصل ضرب حلالیت کلسیم کربنات جبران می‌شود).

ب: در حالت فرضی دوم که روند افزایش دما کمترین حالت احتمالی ممکن در نظر گرفته شده است، تفاوت قابل توجهی در وضعیت شیمی کربنات در ۲۱۰۰ در مقایسه با حالت الف دیده نمی‌شود. نکته قابل ذکر این است که در مقایسه دو فاکتور Ω و

(RCP8.5) خواهد رسید. با استفاده از روابط و ثابت‌های تعادل توسعه یافته و بهینه شده برای آب دریای آزاد، سایر پارامترهای شیمی کربنات از روی داده‌های موجود، محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که میانگین سالانه pH آب دریا در منطقه مورد بررسی قبل از صنعتی شدن احتمالاً حدود ۸/۱۸ (در مقیاس یون هیدروژن کل) بوده است. این پارامتر در سال ۱۹۷۷ یعنی زمانی که گشت دریایی AtlatisII در خلیج فارس در حال انجام بوده است به مقدار ۸/۱۲ رسیده و در سال ۲۰۱۶ با افزایش غلظت CO_2 در اتمسفر و دریا به مقدار حدود ۸/۰۶ رسیده است، عددی که با مقادیر اندازه گیری شده در این منطقه در سال‌های اخیر مطابقت دارد. محاسبات نشان می‌دهد که در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ فاکتور pH کاهش قابل توجهی تا مقادیر کمتر از ۷/۷۲ خواهد داشت (RCP8.5). مقایسه مقدار و روند تغییرات گذشته تا آینده pH با مقادیر محاسبه شده میانگین اقیانوسی (Jiang et al., 2019) حکایت از تطابق این پارامتر در خلیج فارس با مقادیر میانگین سطحی اقیانوسی دارد. مقادیر میانگین سالانه کربن دی‌اکسید محلول کل محاسبه شده در آب دریا نیز در دوره مذکور از مقدار حدود $2006 \mu\text{mol/kg}$ در زمان انقلاب صنعتی به عدد ۲۰۸۷ در سال ۲۰۱۶ (مقدار میانگین تجربی به دست آمده در ۲۰۱۴-۲۰۱۵ برابر با ۲۰۸۶/۲ بوده است (Saleh et al., 2020)) رسیده است و پیش‌بینی می‌شود در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ این پارامتر به مقادیر بیش از ۲۲۶۳ میکرومول بر کیلوگرم برسد (RCP8.5). با توجه به کاهش pH و اسیدی‌تر شدن محیط، قابل انتظار است که سهم توزیع کربنات و بیکربنات نیز در آب دریا به نفع بیکربنات تغییر کند. این شرایط منجر به افزایش ۲۴ درصدی غلظت یون بیکربنات و کاهش ۵۱ درصدی یون کربنات از قبل از صنعتی شدن تا ۲۱۰۰ خواهد شد. کاهش یون کربنات از طرفی باعث کاهش حالت اشباع کربنات کلسیم در آب دریا خواهد شد که البته تا حدود ناچیزی به دلیل اثر معکوس افزایش دما جبران می‌شود، با این حال آب‌های جزیره هنگام با کاهش بیش از ۵۱ درصدی حالت اشباع آراگونیت در قیاس با زمان قبل از صنعتی شدن روبرو خواهند شد. این کاهش اگرچه همچنان شرایط را در حالت فوق اشباع نگه می‌دارد ($\Omega > 1$) ولی با این حال، بر اساس مطالعات معتبری که بر روی آبنسنگ‌های مرجانی صورت گرفته است (Langdon et al., 2000, Marubini et al., 2003, Marubini et al., 2001, Langdon and Atkinson, 2005, Krief et al., 2010, Rodolfo-Metalpa et al., 2010, Holcomb et al.,

آب دریا بیش از ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت که این کاهش احتمالاً منجر به تاثیر کاهشی حدود ۳۸ درصدی در نرخ کلسیفیکاسیون مرجان‌های جزیره هنگام در مقایسه با زمان قبل از انقلاب صنعتی می‌شود. با توجه به اینکه نرخ فرسایش و کلسیفیکاسیون در مرجان‌های خلیج فارس تا حدودی نزدیک به هم است، در انتهای قرن حاضر با کاهش نرخ کلسیفیکاسیون و افزایش سرعت فرسایش مرجان‌ها، برآیند ناگواری عاید ساختارهای کربناتی مرجانی در خلیج فارس خواهد شد.

لازم به ذکر است که در شرایط فعلی و با روند گرم شدن سالانه محیط‌های دریایی و موج‌های گرمایی نامنظمی که به صورت تابستان‌های بسیار گرم به صورت آنومالی‌های چندسالانه منجر به سفیدشدگی و مرگ و میر مرجان‌ها در خلیج فارس می‌شوند احتمالاً استرس دمایی عامل محدود کننده برای بقای مرجان‌ها در خلیج فارس خواهد بود. به عبارتی دیگر بر اساس داده‌های موجود و روندهای پیش رو، مرجان‌های ساکن خلیج فارس که در دماهای نزدیک به آستانه تحمل خود زندگی می‌کنند، همزمان با پدیده اسیدی شدن به عنوان یک تهدید جدی، احتمالاً، تاب تابستان‌های گرم و دماهای بالاتر از آستانه تحمل و سفیدشدگی خود را که با سرعتی فراتر از توان سازش‌پذیریشان در حال افزایش است، نخواهند آورد و دچار آسیب جدی خواهند شد.

۵. سپاسگزاری

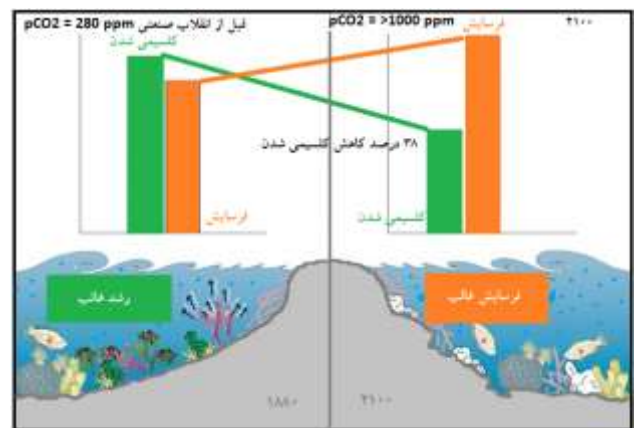
از پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی (INIOAS) و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به دلیل حمایت از این تحقیق در قالب پروژه‌های شماره ۹۳۰۳۰۷۰۱ و (INSF) و ۰۸-۰۱۱-۰۳۹۱ (INIOAS) سپاسگزارم.

منابع

- Bach, L.T., 2015. Reconsidering the role of carbonate ion concentration in calcification by marine organisms. *Biogeosciences* 12, 4939–4951. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4939-2015>
- Bach, L.T., Riebesell, U., Gutowska, M.A., Federwisch, L., Schulz, K.G., 2015. A unifying concept of

SIR به وضوح می‌توان دریافت که در دو حالت دمایی تغییرات حداقلی و حد اکثری، فاکتور SIR تفاوت زیادی نشان نمی‌دهد (عدم وابستگی شدید دمایی) در حالیکه به دلیل حذف جزئی اثر جبرانی دما، کاهش فاکتور Ω در حالت ب حدود ۱۲ درصد بیش از حالت الف می‌باشد.

در کنار فرایند کلسیفیکاسیون، فرایند فرسایش (زیستی، شیمیایی و فیزیکی) آبرنگ‌های مرجانی را نیز باید در نظر گرفت. به نظر می‌رسد در منطقه‌ای مانند خلیج فارس نرخ فرایند فرسایش بسیار نزدیک به نرخ کلسیفیکاسیون بوده (Feary et al., 2013) و با کاهش قابل توجه نرخ کلسیفیکاسیون که همراه با افزایش سرعت فرسایش تا انتهای قرن حاضر رخ خواهد داد، احتمالاً، با برآیند فرسایش و تحلیل رفتن ساختارهای مرجانی تا سال ۲۱۰۰ مواجه خواهیم بود (شکل ۳).



شکل ۳: کاهش نرخ کلسیفیکاسیون و افزایش نرخ فرسایش در انتهای قرن ۲۱ منجر به کاهش مقدار آبرنگ‌های مرجانی در خلیج فارس خواهد شد.

۴. نتیجه گیری کلی

با فرض وقوع سناریوی محتمل پیش‌رو (ICCP RCP8.5)، یعنی افزایش غلظت کربن دی‌اکسید به مقادیر بیش از ۱۰۰۰ ppm و افزایش دمای سطحی آب در خلیج فارس به مقدار حدود ۳/۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به زمان قبل از انقلاب صنعتی، تا سال ۲۱۰۰ میلادی، pH آب دریا با کاهش ۰/۴۶ نسبت به سال ۱۸۸۰ به مقدار کمتر از ۷/۷۲ خواهد رسید. مقدار کربن معدنی محلول از ۲۰۰۶ میکرومول بر کیلوگرم به مقدار ۲۲۶۳ میکرومول بر کیلوگرم افزایش خواهد یافت. غلظت یون بی-کربنات ۲۴ درصد افزایش و یون کربنات ۵۱ درصد کاهش خواهد یافت. حالت اشباع یا سیرشدگی کانی کلسیم کربنات در

- Abdel-Moati, M.A., Al-Khalifa, K.A., Anderson, D.M., Amos, C., Baker, A., Bartholomew, A., Bento, R., Cavalcante, G.H., Chen, C.A., Coles, S.L., Dab, K., Fowler, A.M., George, D., Grandcourt, E., Hill, R., John, D.M., Jones, D.A., Keshavmurthy, S., Mahmoud, H., Moradi Och Tapeh, M., Mostafavi, P.G., Naser, H., Pichon, M., Purkis, S., Riegl, B., Samimi-Namin, K., Sheppard, C., Vajed Samiei, J., Voolstra, C.R., Wiedenmann, J., 2013. Critical research needs for identifying future changes in Gulf coral reef ecosystems. *Mar. Pollut. Bull.* 72, 406–416. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.02.038>
- Gazeau, F., Parker, L.M., Comeau, S., Gattuso, J.P., O'Connor, W.A., Martin, S., Pörtner, H.O., Ross, P.M., 2013. Impacts of ocean acidification on marine shelled molluscs. *Mar. Biol.* 160, 2207–2245. <https://doi.org/10.1007/s00227-013-2219-3>
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A. & Hatziolos, M.E., 2007. Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, 318(5857), 1737-1742.
- Holcomb, M., McCorkle, D.C., Cohen, A.L., 2010. Long-term effects of nutrient and CO₂ enrichment on the temperate coral *Astrangia poculata* (Ellis and Solander, 1786). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 386:27–33.
- Iglesias-Rodriguez, M.D., Halloran, P.R., Rickaby, R.E., Hall, I.R., Colmenero-Hidalgo, E., Gittins, J.R., Green, D.R., Tyrrell, T., Gibbs, S.J., von Dassow, P., Rehm, E., Armbrust, E. V., Boessenkool, K.P., 2008. Phytoplankton calcification in a high-CO₂ world. *Science* (80-.). 320, 336–340. <https://doi.org/10.1126/science.1154122>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. coccolithophore sensitivity to changing carbonate chemistry embedded in an ecological framework. *Prog. Oceanogr.* 135, 125–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.04.012>
- Bach, L.T., Riebesell, U., Schulz, K.G., 2011. Distinguishing between the effects of ocean acidification and ocean carbonation in the coccolithophore *Emiliania huxleyi*. *Limnol. Oceanogr.* 56, 2040–2050. <https://doi.org/doi:10.4319/lo.2011.56.6.2040>
- Chan, N.C.S., Connolly, S.R., 2013. Sensitivity of coral calcification to ocean acidification: a meta-analysis. *Glob Chang Biol* 19:282–290.
- Cohen, A.L., and M. Holcomb., 2009. Why corals care about ocean acidification: Uncovering the mechanism. *Oceanography* 22(4):118–127.
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Eakin, C. M., Kleypas, J., & Hoegh-Guldberg, O., 2008. Global climate change and coral reefs: rising temperatures, acidification and the need for resilient reefs. In: *Status of coral reefs of the world*, edited by C.R. Wilkinson. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia, 296 p.
- Feary, D.A., Burt, J.A., Bauman, A.G., Al Hazeem, S.,

- pCO₂ on photosynthesis and calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 110(C9):C09S07.
- Langdon, C., Broecker, W.S., Hammond, D.E., Glenn, E., Fitzsimmons, K., Nelson, S.G., Peng, T.-H., Hajdas, I., Bonani, G., 2003. Effect of elevated CO₂ on the community metabolism of an experimental coral reef. *Global Biogeochem. Cycles* 17. <https://doi.org/doi:10.1029/2002GB001941>
- Langdon, C., T. Takahashi, C. Sweeney, D. Chipman, J. Goddard, F. Marubini, H. Aceves, H. Barnett, and M.J. Atkinson. 2000. Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles* 14(2):639–654.
- Lough, J.M., Anderson, K.D. & Hughes, T.P., 2018. Increasing thermal stress for tropical coral reefs: 1871–2017. *Sci Rep* 8, 6079. doi:10.1038/s41598-018-24530-9
- Madani, S., Ahmadian, M., KhaliliAraghi, M. and Rahbar, F., 2012. Estimating total economic value of coral reefs of Kish Island (Persian Gulf). *International Journal of Environmental Research*. 6:51-60.
- Maghsoudlou, A., Araghi, P.E., Wilson, S., Taylor, O. and Medio, D., 2008. Status of coral reefs in the ROPME Sea Area (The Persian Gulf, Gulf of Oman and Arabian Sea). In: Wilkinson CR (eds) *Status of coral reefs of the world Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre*, Townsville, Australia, 296 P.
- Marubini, F., Barnett, H., Langdon, C., Atkinson, M., 2001. Dependence of calcification on light and carbonate ion concentration for the hermatypic coral *Porites compressa*. *Marine Ecology Progress Series*, 220:153–162.
- Marubini, F., Ferrier-Pages, C., Cuif, J.P., 2003. Suppression of skeletal growth in scleractinian corals Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jokiel, P.L., Jury, C.P., Rodgers, K.S., 2014. Coral-algae metabolism and diurnal changes in the CO₂-carbonate system of bulk sea water. *PeerJ* 2, e378. <https://doi.org/10.7717/peerj.378>
- Jokiel, P.L., K.S. Rodgers, I.B. Kuffner, A.J. Andersson, E.F. Cox, and F.T. Mackenzie. 2008. Ocean acidification and calcifying reef organisms: A mesocosm investigation. *Coral Reefs* 27(3):473–483.
- Jokiel, Paul L., 2011. Ocean acidification and control of reef coral calcification by boundary layer limitation of proton flux, *Bulletin of Marine Science*. <https://doi.org/10.5343/bms.2010.1107>
- Jokiel, Paul L., 2011. The reef coral two compartment proton flux model: A new approach relating tissue-level physiological processes to gross corallum morphology. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 409, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.10.008>
- Kleypas, J., Langdon, C., 2006. *Coral Reefs and Changing Seawater Carbonate Chemistry*. <https://doi.org/10.1029/61CE06>
- Krief, S., Hendy, E.J., Fine, M., Yam, R., Meibom, A., Foster, G.L., Shemesh, A., 2010. Physiological and isotopic responses of scleractinian corals to ocean acidification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74:4988–5001.
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Glob Chang Biol* 19:1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- Langdon, C. and Atkinson, M.J., 2005. Effect of elevated

- https://doi.org/10.3334/CDIAC/otg.CO2SYS_XLS_CD_IAC105a
- Riebesell U., & T.P.D., 2011. Ocean acidification. Oxford: Oxford University Press.
- Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ferrier-Pages, C., Gattuso, J.P., 2010. Response of the temperate coral *Cladocora caespitosa* to mid- and long-term exposure to pCO₂ and temperature levels projected for the year 2100 AD. *Biogeosciences*, 7, 289–300.
- Saleh, A., Vajed Samiei, J., Amini-Yekta, F., Seyed Hashtroudi, M., Chen, C.-T.A., Fumani, N.S., 2020. The carbonate system on the coral patches and rocky intertidal habitats of the northern Persian Gulf: Implications for ocean acidification studies. *Mar. Pollut. Bull.* 151, 110834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110834>
- Vajed Samiei, J., Saleh, A., Shirvani, A., Sheijooni Fumani, N., Hashtroudi, M., Pratchett, M.S., 2016. Variation in calcification rate of *Acropora downingi* relative to seasonal changes in environmental conditions in the northeastern Persian Gulf. *Coral Reefs* 35. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1464-6>.
- by decreasing ambient carbonate-ion concentration: a crossfamily comparison. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 270, 179–184.
- NOAA Coral Reef Watch. Monthly and Annual Composites of 5km Satellite Coral Bleaching Heat Stress Products (Version 3.1), 1985 to 2019. Data set accessed 2019-19-10 at <https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/hdf/index.php>.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.-K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L., Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y., Yool, A., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681. <https://doi.org/10.1038/nature04095> <https://www.nature.com/articles/nature04095#supplementary-information>
- Pierrot, D.E.L., Wallace, D.W.R., 2006. MS Excel Program Developed for CO₂ System Calculations.