

گرمایش جهانی، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و پاسخ جانوران کربنات کلسیم ساز

نسیم نوروزی^۱، نرگس امراللهی بیوکی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان

۲- استادیار گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان

amrollahi@hormozgan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۵

چکیده

به‌طورمعمول سطح آب اقیانوس‌ها با کربنات کلسیم اشباع شده است، اما افزایش غلظت CO₂ اتمسفری، منجر به کاهش میزان غلظت یون کربنات و نیز pH آب دریاها و اقیانوس‌ها شده است. پیش‌بینی‌ها حاکی از این است که تا پایان قرن، شاهد دو برابر شدن میزان CO₂ و در نتیجه افزایش ۳ درجه‌ای میانگین دمای آب اقیانوسی و کاهش pH تا ۰/۴ - ۰/۳ واحد نسبت به pH امروزی آب‌ها خواهیم بود. شواهد تجربی گویای این امر می‌باشد که چنانچه این روند ادامه یابد ارگانسیم‌ها و موجودات کلیدی دریاها همچون مرجان‌ها و برخی از پلانکتون‌های کربنات کلسیم ساز برای ساخت کربنات کلسیم موردنیاز خود با مشکل مواجه خواهند شد و ادامه آن می‌تواند منجر به مرگ این موجودات و آسیب رسیدن به این اکوسیستم‌های حساس گردد و باعث از بین رفتن بخش عظیمی از تنوع زیستی آب‌ها شود. در این مطالعه ضمن تشریح فرایند صورت گرفته در اثر ورود CO₂ به محیط‌های آبی، راجع به تأثیرات آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و نیز پیامدهای آن برای موجودات کربنات کلسیم ساز به بحث پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، کربنات کلسیم، OA، CO₂.

مقدمه

عوامل محیطی و ژنتیکی به‌طور مداوم در حال تغییرند و بر محیط‌زیست و تکامل گونه‌ها تأثیر می‌گذارند (Sørensen *et al.*, 2003). تمدن بشری در یک دوره غیرمعمول ثبات، شکل گرفته است اما به دلیل تأثیر جهانی انسان‌ها بر زندگی، این ثبات ممکن است در معرض خطر باشد. در طول چندین دهه، انسان‌ها مسئول آسیب رساندن به بسیاری از اکوسیستم‌ها، از طریق آلوده کردن محیط با آلاینده‌ها و تخریب بیش از حد زیستگاه‌های آن اکوسیستم هستند (Freedman, 1995). ما اکنون دریافته‌ایم که می‌توانیم بر مقیاس‌های جهانی تأثیرگذار باشیم و همین امر سبب ورودمان به عصر جدیدی به نام Anthropocene شده است (Zalasiewicz *et al.*, 2008). مثال قابل توجهی برای این موضوع، تغییرات اقلیم است. از زمان آغاز انقلاب صنعتی و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، میزان غلظت

CO₂ اتمسفر جهانی از ۲۸۰ به ۳۸۰ ppm افزایش یافته است و انتظار می‌رود که تا سال ۲۱۰۰ حتی به دو برابر این میزان برسد (Dupont *et al.*, 2010).

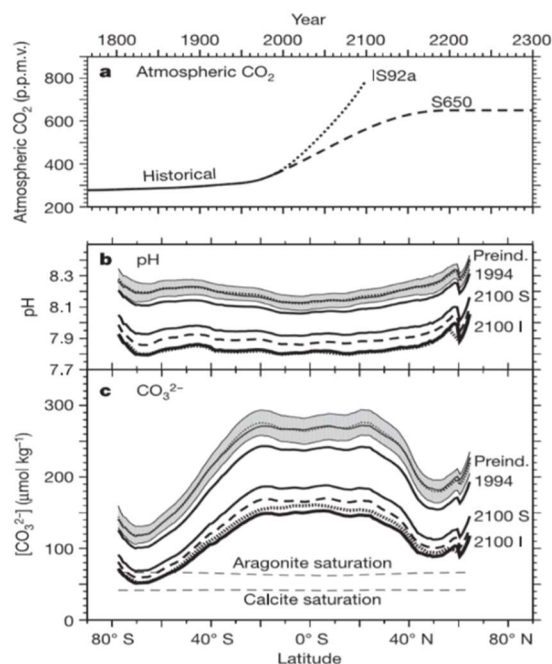
اگرچه جذب CO₂ توسط اقیانوس‌ها به تعدیل و وضعیت آب و هوایی آینده کمک می‌کند، اما خصوصیات شیمیایی آب دریا به علت فرایند هیدرولیز CO₂ در آب و افزایش ایجاد یون [H⁺] تغییر می‌کند. میزان pH کنونی آب دریاها حدود ۰/۱ واحد نسبت به آنچه پیش از انقلاب صنعتی بود کاهش یافته است. بر اساس پیش‌بینی IS92a، این افزایش ۱۰۰ تا ۱۵۰ درصدی غلظت یون [H⁺] تا پایان قرن، سبب کاهش ۰/۳-۰/۴ واحدی pH خواهد شد (Brewer, 1997; Haugan and Drange, 1996). به‌طور هم‌زمان میزان غلظت CO₂ آبی [CO₂(aq)] افزایش خواهد یافت و غلظت یون [CO₃²⁻] کاهش می‌یابد. ادامه روند جذب CO₂ توسط اقیانوس‌ها باعث افزایش غلظت یون [H⁺] اقیانوسی و در نتیجه کاهش pH اقیانوس‌ها می‌شود. این روند را اسیدی شدن آب اقیانوس‌ها (OA: Ocean acidification) می‌نامند (Caldeira and Wickett, 2003). این امر شرایط را برای موجودات کربنات کلسیم ساز دریا، جهت ساخت کربنات کلسیم بیوژنیک (CaCO₃) دشوارتر خواهد کرد و این موجودات ناچار با شرایطی روبرو خواهند شد که اجدادشان هیچ‌گاه تجربه نکرده بودند (Gattuso *et al.*, 1998; Kleypas *et al.*, 1999; Langdon *et al.*, 2003, Ruttimann, 2006). میزان کلسیفیکاسیون به سبب واکنش [CO₃²⁻] با CO₂ اتمسفری در حال افزایش مطابق واکنش زیر، کاهش خواهد یافت:



این میزان، حتی زمانی که آب‌های سطحی با CaCO₃ به حد فوق‌العاده اشباع برسد نیز کاهش خواهد داشت. شرایطی که مطالعات پیشین پیش‌بینی کرده‌اند که برای صدها سال ادامه خواهد داشت (Broecker *et al.*, 1979; Feely *et al.*, 2004; Kleypas *et al.*, 1999). علاوه بر این، افزایش CO₂ اتمسفری، سبب افزایش درجه حرارت متوسط اقیانوس‌ها حدود ۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد و افزایش سطح آب‌های اقیانوسی در حدود ۱۷ سانتی‌متر شده است (Solomon *et al.*, 2007). پیش‌بینی شده که این تغییرات سبب افزایش دمای اقیانوس‌ها تا ۳ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ خواهد شد (Prada *et al.*, 2017). سایر تغییرات شیمیایی و فیزیکی در اقیانوس‌ها به سبب دخالت‌های انسان، موجب کاهش میزان اکسیژن محلول در آب (DO: Dissolved Oxygen) و تغییرات چرخه‌های اقیانوسی خواهد شد (Andrews *et al.*, 2013; Cai *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2012).

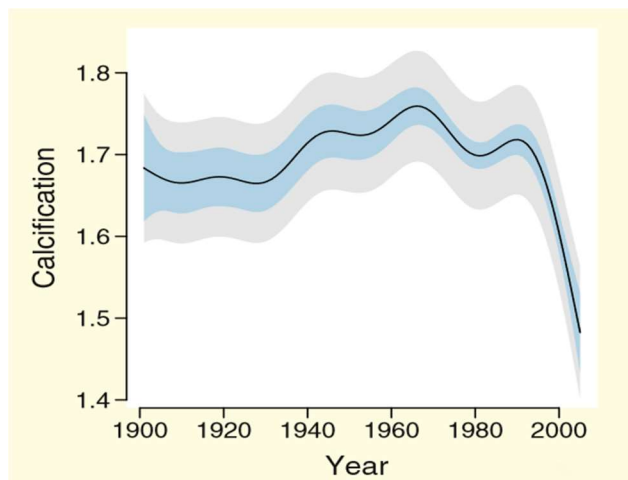
الف - تأثیرات تغییر اقلیم بر کلسیفیکاسیون و موجودات کربنات کلسیم ساز

تغییرات شیمیایی در آب دریاها که در قرن اخیر شدت گرفته، می‌تواند عواقب شدیدی برای موجودات کربنات کلسیم ساز به همراه داشته باشد (Orr *et al.*, 2005). اسیدی شدن اقیانوس، موجودات کربنات کلسیم ساز دریایی را در ساخت پوسته و اسکلت‌های کربنات کلسیمی خود به چالش می‌کشد (طبق واکنشی که در مقدمه از آن صحبت شد). مطالعات تجربی در این زمینه، پاسخ‌های منفی موجودات هتروتروف و اتوتروف را نسبت به اسیدی شدن اقیانوس نشان می‌دهد. اگرچه نتایج به دست آمده متغیر است اما به‌طور کلی افزایش تنش حرارتی، مزید بر علت شده و حساسیت این موجودات را افزایش می‌دهد (Harvey *et al.*, 2013; Kroeker *et al.*, 2013; Nagelkerken and Connell, 2015). مطالعات و پژوهش‌های مربوط به کلسیفیکاسیون در MCID (Marine climate-change impacts database) به نسبت کم است (۲ درصد از کل پژوهش‌های آن، حدود ۴۰ مورد). از این پژوهش‌ها ۳۶ مورد به مرجان‌ها و ۴ مورد به فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌های وابسته به کربنات کلسیم اختصاص دارد (Halloran *et al.*, 2008).



شکل ۱. روند تغییر میزان CO_2 اتمسفری و در نتیجه میزان CO_3^{2-} و pH اقیانوس‌ها (Orr *et al.*, 2005)

اسکلت‌های مرجانی حاوی اطلاعات ارزشمندی در خصوص شرایط محیطی گذشته و میزان کلسیفیکاسیون آن‌ها می‌باشند (Lough, 2010). به‌طور کلی هسته‌های مرجانی عظیم (مثل گونه‌های *Porites*) و بخش‌هایی از مرجان‌های شاخه‌ای، کاهش میزان کلسیفیکاسیون و کاهش میزان رشد را به علت گرما و اسیدی شدن اقیانوس‌ها نشان می‌دهند. میزان گسترش، کلسیفیکاسیون و تراکم اسکلتی مرجان‌ها به هم مرتبط هستند و باید به‌طور پیوسته مورد بررسی قرار گیرند تا پاسخ‌های مرجان‌ها را به تغییرات محیطی آشکار کنند (Lough and Cooper, 2011). در برخی مطالعات، کاهش میزان رشد و کلسیفیکاسیون به جای دو عامل اسیدی شدن اقیانوس و گرمای جهانی، تنها به تغییرات دما نسبت داده شده‌اند و دما را به عنوان تنها عامل محدودکننده رشد در نظر گرفته‌اند. افزایش رشد و کلسیفیکاسیون در برخی از کلنی‌های *Porites* در غرب و شرق استرالیا با پیش‌بینی‌های ناشی از تغییر دما مطابقت دارد چراکه این تغییرات و افزایش دما، دمای این مناطق را به دمایی مطلوب برای رشد این مرجان‌ها تبدیل کرده است (Cooper *et al.*, 2012).

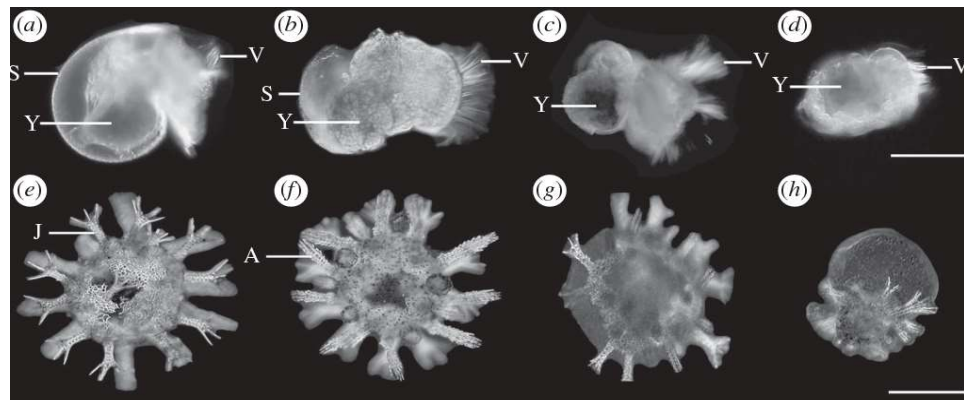


شکل ۲. کاهش میزان کلسیفیکاسیون در دهه‌های اخیر (Brierley and Kingsford, 2009)

مرجان‌های مناطق گرمسیری از GBR (Great barrier reef) در شرق استرالیا، از سال ۱۹۷۰ به بعد کاهش رشد داشته‌اند که این امر با دو عامل اسیدی شدن و افزایش دمای اقیانوسی قابل توجه است (De'ath *et al.*, 2009). با این وجود تحقیقات بعدی نشان داده که در حال حاضر دما و تأثیراتی که از خشکی‌ها بر مرجان‌ها اعمال می‌شود (مواد مغذی و رسوباتی از خشکی‌ها به آب‌های مناطق مرجانی وارد می‌شوند) حتی بیش از اسیدی شدن اقیانوس‌ها، کاهش رشد و مرگ مرجان‌ها را توجیه می‌کند (D'Olivo *et al.*, 2013).

علیرغم شواهد و مطالعات تجربی که حساسیت بسیاری از گروه‌های تاکسونومیکی را به اسیدی شدن اقیانوس نشان می‌دهند، مطالعات اندکی خارج از بحث تأثیرات اسیدی شدن اقیانوس بر مرجان‌ها انجام شده است (Beare *et al.*, 2013). تغییرات مشاهده شده در گونه‌های پلانکتونی را عمدتاً به علت حساسیت به تغییرات دما و تأثیرات ناشی از افزایش مواد مغذی و شکارچی می‌دانند. هیچ ارتباطی میان داده‌های گسترده ۶۰ ساله از پلانکتون‌های کربنات کلسیم ساز در شمال شرق اقیانوس اطلس و روند تغییرات pH وجود ندارد، با این حال بررسی‌های بلندمدت‌تر، تأثیر اسیدی شدن اقیانوس را بر این دسته از پلانکتون‌ها آشکار می‌کنند. نتایج حاصل از این مطالعات، حاکی از کاهش وزن پوسته کربنات کلسیمی این پلانکتون‌هاست که می‌تواند با اسیدی شدن اقیانوس‌ها توجیه گردد (Moy *et al.*, 2009).

شاهد مثال دیگری برای این موضوع، نتایج حاصل از پژوهش‌های Byrne و همکارانش بود که نشان داد در اثر القای pH پیش‌بینی شده برای سال ۲۱۰۰ به محیط لارو آبالون *Haliotis coccoradiata* و توتیاهای جوانی از گونه *Heliocidaris erythrogramma* که تازه مرحله‌ی متامورفوز خود را پشت سر گذاشته‌اند، سبب شد لارو آبالون فاقد پوسته شده و توتیاهای جوان خارهای سست و کوتاهی ایجاد کنند (Byrne, 2012).



(الف)

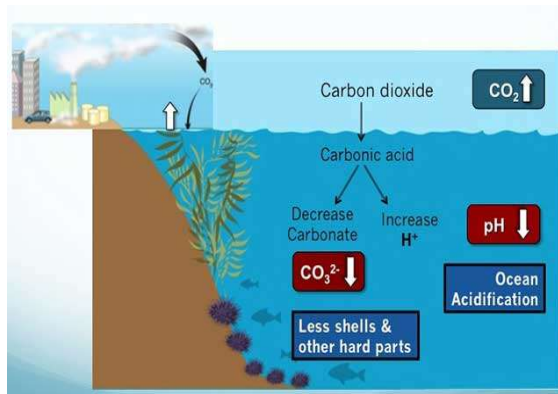


(ب)

شکل ۳. الف (a-d): لارو آبالون *Haliotis coccoradiata* – (e-h): نوتیای جوان *Haliotis erythrogramma* (ب) حل شدن پوسته کربنات کلسیمی Pteropod در آب دریایی که pH آن به pH پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۱۰۰ رسیده است (David Liittschwager/National Geographic Stock).

با ادامه روند اسیدی شدن و گرمای جهانی، موجودات کربنات کلسیمی در عرض‌های جغرافیایی بالاتر نیز مورد تهدید قرار خواهند گرفت. از میان آن‌ها می‌توان به مرجان‌های آب سرد اشاره کرد که خود زیستگاه بسیاری از ماهی‌ها و موجودات دریایی هستند. با از بین رفتن مرجان‌ها در عرض‌های جغرافیایی مختلف، زندگی تمامی موجودات و ارگانیسم‌های وابسته به آن‌ها نیز در معرض خطر قرار می‌گیرد و این ذخایر زیستی رو به انحطاط و نابودی خواهند رفت (Freiwald *et al.*, 2004).

با دو برابر شدن میزان CO_2 ، خارپوستان هم که دسته دیگری از موجودات کربنات کلسیم ساز هستند، رشدشان متوقف شده و اسکلت خارجی شکننده و ضعیفی خواهند ساخت (Shirayama and Thornton, 2005). در این غلظت از CO_2 ، میزان کلسیفیکاسیون در موجودات کربنات کلسیم ساز ساکن بخش‌های مناطق کم‌عمق، تقریباً به نصف خواهد رسید. برخی از این موجودات کربنات کلسیم ساز حتی به سختی می‌توانند تا رسیدن کربنات کلسیم به سطح زیر اشباع دوام بیاورند و زنده بمانند. این وضعیتی است که حتی اجداد این موجودات تا ۴۰۰ هزار سال پیش نیز تجربه نکرده بودند (Pearson and Palmer, 1999).



شکل ۴. تأثیرات CO₂ بر میزان کربنات و pH اقیانوس‌ها (O'Neill and Nicholson-Cole, 2009)

ب - رویکرد جهانی و دعوت به مشارکت در طرح‌های مقابله با تغییر اقلیم

این تغییرات در دما و اسیدیته و سایر فاکتورهای محیط آبی که منجر به تغییرات حساسیت جانوران و اکوسیستم‌های آبی شده، جامعه جهانی را به تکاپو واداشته و سبب ایجاد کنوانسیون‌ها و طرح‌هایی در جهت مقابله و کاهش این وضعیت گردیده است (Heller and Zavaleta, 2009). در مقیاس جهانی، کاهش سریع در انتشار CO₂ از ضروری‌ترین و اولین اقدامات در جهت کاهش تغییرات اقلیم ناشی از دخالت انسان است. در سال ۲۰۱۵ میلادی توافق‌نامه‌ای در پاریس میان ۱۹۵ کشور در جهت این رویکرد جهانی ایجاد شد (Duarte *et al.*, 2017). در کنار اقدام دولت‌ها، آگاهی بخشی عموم و درخواست کمک از آن‌ها برای گام برداشتن در جهت کاهش میزان CO₂ ورودی به اتمسفر که راه مستقیم مقابله با گرمای جهانی و پیامدهای آن می‌باشد، در اولویت و صدر لیست فعالان این زمینه قرار دارد (Berkes *et al.*, 2006; Denman, 2008; Datta and Sarkar, 2018; Duarte *et al.*, 2017; Schiermeier *et al.*, 2008; Semesi *et al.*, 2009).

بحث و جمع‌بندی

فقدان شواهد تجربی کافی در تغییرات میزان کلسیفیکاسیون، با توجه به جدید بودن نگرانی جهانی نسبت به اسیدی شدن اقیانوس و توسعه آهسته تکنولوژی برای سنجش طولانی مدت اسیدیته اقیانوس، امر عجیبی نیست (Andersson *et al.*, 2015). با این حال شواهد و مدارک موجود گویای این امر می‌باشند که اسیدی شدن اقیانوس، ریسک و خطر بزرگی برای اکوسیستم‌های دریایی است (Gattuso *et al.*, 2015). تغییرات دمایی و اسیدی شدن اقیانوس، با در نظر گرفتن آستانه فیزیولوژیکی مرجان‌ها نشان می‌دهند که این اکوسیستم‌های غنی و ذخایر زیستی به شدت تحت تأثیر اسیدیته اقیانوس قرار گرفته‌اند (Hoegh-Guldberg, 2004). مطالعات انجام شده در خصوص CO₂ وارد شده از فوران آتشفشانی به دریاها، کاهش فراوانی بی‌مهرگان کربنات کلسیم ساز شامل مرجان‌ها و جلبک‌ها بر اثر تغییرات pH را نشان می‌دهند (Fabricius *et al.*, 2014, Gil-Díaz *et al.*, 2014). علاوه بر این، سوابق

گیاه‌شناسی در طول ۳ دهه، از کاهش میزان کلسیفیکاسیون در جلبک قهوه‌ای *Padina pavonica* در جزایر قناری، همراه با کاهش میزان pH در آب‌های سطحی این منطقه خبر می‌دهد (Gil-Díaz *et al.*, 2014). به‌طور گسترده‌تر، مدارک و مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که افزایش اسیدیتۀ اقیانوس‌ها در قرن ۲۱ به‌شدت موجودات اقیانوسی را تحت تأثیر قرار داده است، اما برای آشکار کردن تأثیرات طولانی مدت این امر بر پویایی جمعیت و عملکرد اکوسیستم‌های دریایی به پژوهش‌های بیشتری نیاز است (Andersson *et al.*, 2015; Fabricius *et al.*, 2014; Gattuso *et al.*, 2015; Gil-Díaz *et al.*, 2014; Hoegh-Guldberg, 2004; Riebesell and Gattuso, 2014). این مطالعات و آگاهی‌بخشی‌ها کمک کرده تا در دهه‌های اخیر با کنوانسیون‌ها و وضع قوانین در خصوص کاهش تولید CO₂ و نیز ایجاد چارچوبی برای مهار و جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به محیط‌های آبی، انسان‌ها سعی در کنترل سرعت اسیدی شدن اقیانوس و کنترل گرمایش جهانی داشته باشند که روزنه‌آمیدی برای جلوگیری از شدت گرفتن این مسئله است (Meinshausen *et al.*, 2009).

توصیه ترویجی

- مهمترین تلاش‌ها برای کمک به کنترل سرعت اسیدی شدن اقیانوس و کنترل گرمایش جهانی عبارت‌اند از:
- آگاهی بخشی مردم نسبت به این خطر جدی و دعوت به همکاری در برنامه‌های مقابله با آن
- طراحی و هدف‌گذاری برای پیاده کردن طرح‌هایی جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه CO₂:
- کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی به ویژه در حمل‌ونقل‌ها و جایگزین کردن خودروهای هیبریدی و دوستدار محیط‌زیست
- ایجاد مزارع بادی و تابیدال بریج‌ها و روش‌های فاقد انتشار CO₂ برای تولید الکتریسیته
- کاشت درختان و ایجاد کمربند سبز گیاهی در اطراف صنایع
- ایجاد مزارع کشت جلبک برای کاهش اسیدیتۀ آب‌های محلی

منابع

- 1- Andersson, A.J., Kline, D.I., Edmunds, P.J., Archer, S.D., Bednaršek, N., Carpenter, R.C., Chadsey, M., Goldstein, P., Grotto, A.G., Hurst, T.P. and King, A.L., 2015. Understanding ocean acidification impacts on organismal to ecological scales. *Oceanography*, 28(2), pp.16-27.
- 2- Andrews, O.D., Bindoff, N.L., Halloran, P.R., Ilyina, T. and Quéré, C.L., 2013. Detecting an external influence on recent changes in oceanic oxygen using an optimal fingerprinting method. *Biogeosciences*, 10(3), pp.1799-1813.
- 3- Beare, D., McQuatters-Gollop, A., van der Hammen, T., Machiels, M., Teoh, S.J. and Hall-Spencer, J.M., 2013. Long-term trends in calcifying plankton and pH in the North Sea. *PLoS One*, 8(5), p.e61175.
- 4- Berkes, F., Hughes, T.P., Steneck, R.S., Wilson, J.A., Bellwood, D.R., Crona, B., Folke, C., Gunderson, L.H., Leslie, H.M., Norberg, J. and Nyström, M., 2006. Globalization, roving bandits, and marine resources. *Science*, 311(5767), pp.1557-1558.
- 5- Brewer, P.G., 1997. Ocean chemistry of the fossil fuel CO₂ signal: The haline signal of "business as usual". *Geophysical Research Letters*, 24(11), pp.1367-1369.

- 6- Brierley, A.S. and Kingsford, M.J., 2009. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current biology*, 19(14), pp.R602-R614.
- 7- Broecker, W.S., Takahashi, T., Simpson, H.J. and Peng, T.H., 1979. Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget. *Science*, 206(4417), pp.409-418.
- 8- Byrne, M., 2012. Global change ecotoxicology: identification of early life history bottlenecks in marine invertebrates, variable species responses and variable experimental approaches. *Marine environmental research*, 76, pp.3-15.
- 9- Cai, W., Shi, G., Cowan, T., Bi, D. and Ribbe, J., 2005. The response of the Southern Annular Mode, the East Australian Current, and the southern mid-latitude ocean circulation to global warming. *Geophysical Research Letters*, 32(23).
- 10- Caldeira, K. and Wickett, M.E., 2003. Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425(6956), p.365.
- 11- Cooper, T.F., O'Leary, R.A. and Lough, J.M., 2012. Growth of Western Australian corals in the Anthropocene. *Science*, 335(6068), pp.593-596.
- 12- Datta, R. and Sarkar, D., 2018. Bio-Buffering to Combat Ocean Acidification?. *Current Pollution Reports*, 4(4), pp.283-284.
- 13- D'Olivo, J.P., McCulloch, M.T. and Judd, K., 2013. Long-term records of coral calcification across the central Great Barrier Reef: assessing the impacts of river runoff and climate change. *Coral Reefs*, 32(4), pp.999-1012.
- 14- De'ath, G., Lough, J.M. and Fabricius, K.E., 2009. Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 323(5910), pp.116-119.
- 15- Denman, K.L., 2008. Climate change, ocean processes and ocean iron fertilization. *Marine Ecology Progress Series*, 364, pp.219-225.
- 16- Duarte, C.M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A. and Krause-Jensen, D., 2017. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?. *Frontiers in Marine Science*, 4, p.100.
- 17- Dupont, S., Ortega-Martinez, O. and Thorndyke, M., 2010. Impact of near-future ocean acidification on echinoderms. *Ecotoxicology*, 19(3), pp.449-462.
- 18- Fabricius, K.E., De'ath, G., Noonan, S. and Uthicke, S., 2014. Ecological effects of ocean acidification and habitat complexity on reef-associated macroinvertebrate communities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1775), p.20132479.
- 19- Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J. and Millero, F.J., 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305(5682), pp.362-366.
- 20- Freedman, B., 1995. *Environmental ecology: the ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses*. Elsevier.
- 21- Freiwald, A., Fossa, J.H., Grehan, A., Koslow, T. and Roberts, J.M., 2004. *Cold-water coral reefs: out of sight-no longer out of mind*. UNEP-WCMC.
- 22- Gattuso, J.P., Frankignoulle, M., Bourge, I., Romaine, S. and Buddemeier, R.W., 1998. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global and Planetary Change*, 18(1-2), pp.37-46.
- 23- Gattuso, J.P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W.W., Howes, E.L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S.R., Eakin, C.M. and Hoegh-Guldberg, O., 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349(6243), p.aac4722.

- 24- Gil-Díaz, T., Haroun, R., Tuya, F., Betancor, S. and Viera-Rodríguez, M.A., 2014. Effects of ocean acidification on the brown alga *Padina pavonica*: decalcification due to acute and chronic events. *PLoS one*, 9(9), p.e108630.
- 25- Halloran, P.R., Hall, I.R., Colmenero-Hidalgo, E. and Rickaby, R.E.M., 2008. Evidence for a multi-species coccolith volume change over the past two centuries: understanding a potential ocean acidification response. *Biogeosciences*, 5(6).
- 26- Harvey, B.P., Gwynn-Jones, D. and Moore, P.J., 2013. Meta-analysis reveals complex marine biological responses to the interactive effects of ocean acidification and warming. *Ecology and evolution*, 3(4), pp.1016-1030.
- 27- Haugan, P.M. and Drange, H., 1996. Effects of CO₂ on the ocean environment. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8), pp.1019-1022.
- 28- Heller, N.E. and Zavaleta, E.S., 2009. Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological conservation*, 142(1), pp.14-32.
- 29- Hoegh-Guldberg, O., 2004. Coral reefs in a century of rapid environmental change. *Symbiosis*, 37(1), pp.1-31.
- 30- Kleypas, J.A., Buddemeier, R.W., Archer, D., Gattuso, J.P., Langdon, C. and Opdyke, B.N., 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *science*, 284(5411), pp.118-120.
- 31- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M. and Gattuso, J.P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global change biology*, 19(6), pp.1884-1896.
- 32- Langdon, C., Broecker, W.S., Hammond, D.E., Glenn, E., Fitzsimmons, K., Nelson, S.G., Peng, T.H., Hajdas, I. and Bonani, G., 2003. Effect of elevated CO₂ on the community metabolism of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(1).
- 33- Lough, J.M., 2010. Climate records from corals. *Wiley interdisciplinary reviews: climate change*, 1(3), pp.318-331.
- 34- Lough, J.M. and Cooper, T.F., 2011. New insights from coral growth band studies in an era of rapid environmental change. *Earth-Science Reviews*, 108(3-4), pp.170-184.
- 35- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J. and Allen, M.R., 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 C. *Nature*, 458(7242), p.1158.
- 36- Moy, A.D., Howard, W.R., Bray, S.G. and Trull, T.W., 2009. Reduced calcification in modern Southern Ocean planktonic foraminifera. *Nature geoscience*, 2(4), p.276.
- 37- Nagelkerken, I. and Connell, S.D., 2015. Global alteration of ocean ecosystem functioning due to increasing human CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(43), pp.13272-13277.
- 38- O'Neill, S. and Nicholson-Cole, S., 2009. "Fear won't do it" promoting positive engagement with climate change through visual and iconic representations. *Science Communication*, 30(3), pp.355-379.
- 39- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F. and Key, R.M., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059), p.681.

- 40- Pearson, P.N. and Palmer, M.R., 1999. Middle Eocene seawater pH and atmospheric carbon dioxide concentrations. *Science*, 284(5421), pp.1824-1826.
- 41- Prada, F., Caroselli, E., Mengoli, S., Brizi, L., Fantazzini, P., Capaccioni, B., Pasquini, L., Fabricius, K.E., Dubinsky, Z., Falini, G. and Goffredo, S., 2017. Ocean warming and acidification synergistically increase coral mortality. *Scientific reports*, 7, p.40842.
- 42- Riebesell, U. and Gattuso, J.P., 2014. Lessons learned from ocean acidification research. *Nature Climate Change*, 5(1), p.12.
- 43- Ruttimann, J., 2006. Oceanography: sick seas. Nature Publishing Group.
- 44- Schiermeier, Q., Tollefson, J., Scully, T., Witze, A. and Morton, O., 2008. Energy alternatives: Electricity without carbon. *Nature News*, 454(7206), pp.816-823.
- 45- Semesi, I.S., Beer, S. and Björk, M., 2009. Seagrass photosynthesis controls rates of calcification and photosynthesis of calcareous macroalgae in a tropical seagrass meadow. *Marine Ecology Progress Series*, 382, pp.41-47.
- 46- Shirayama, Y. and Thornton, H., 2005. Effect of increased atmospheric CO₂ on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C9).
- 47- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K. and Marquis, M. eds., 2007. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press.
- 48- Sørensen, J.G., Kristensen, T.N. and Loeschcke, V., 2003. The evolutionary and ecological role of heat shock proteins. *Ecology letters*, 6(11), pp.1025-1037.
- 49- Wu, L., Cai, W., Zhang, L., Nakamura, H., Timmermann, A., Joyce, T., McPhaden, M.J., Alexander, M., Qiu, B., Visbeck, M. and Chang, P., 2012. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, 2(3), p.161.
- 50- Zalasiewicz, J., Williams, M., Smith, A., Barry, T.L., Coe, A.L., Bown, P.R., Brenchley, P., Cantrill, D., Gale, A., Gibbard, P. and Gregory, F.J., 2008. Are we now living in the Anthropocene?. *Gsa Today*, 18(2), p.4.