

## پیش‌بینی سطح سازگاری مورد نیاز آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در شرایط تغییر اقلیم در سال ۲۰۹۹

### چکیده

گرمایش جهانی در ایران که یکی از نمایه‌های آن افزایش میانگین دمای سطح آب در خلیج فارس است، باعث سفید شدگی و مرگ‌ومیر گسترده در جوامع مرجانی خلیج فارس شده است. هدف اساسی این تحقیق برآورد سطح سازگاری مورد نیاز آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در شرایط اقلیم شبیه‌سازی شده سال ۲۰۹۹ است. در این راستا دمای سطح آب خلیج فارس تا سال ۲۰۹۹ با خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3 تحت سناریوی A2 و ریزمقیاس نمایی آماری SDSM، شبیه‌سازی گردید. با به‌کارگیری مدل تحلیل همبستگی پیرسون ارتباط بین میزان پدیده سفید شدگی و میانگین دمای سطح آب بخش شمالی خلیج فارس در اقلیم دوره پایه (۱۹۸۲-۲۰۱۷)، به دست آمد و یک مدل برآوردگر خطی برای برآورد آن توسعه داده شد. در نهایت در مدل برآوردگر توسعه داده شده، از سری زمانی شبیه‌سازی شده دمای سطح آب تحت سناریوی A2 برای دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۹۹، استفاده گردید و میزان فرایند سفید شدگی برای آن دوره شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که پیک افزایش دمای آب در ماه‌های شهریور و مرداد بوده است و در این دو ماه بیشترین استرس حرارتی روی کلونی‌های مرجانی وارد خواهد شد. کلونی‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در دوره تغییر اقلیم تا سال ۲۰۶۰ با مشکل حادی روبرو نخواهند شد و توانایی سازگاری با اقلیم آن دوره را در بدبینانه‌ترین سناریو دارند. درحالی‌که از سال ۲۰۶۰ به بعد به‌صورت پیوسته آنومالی‌های مثبت دمای سطح آب شروع شده و آب سنگ‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در شرایط اقلیمی سال ۲۰۶۰ به بعد نیاز به این دارند که سطح سازگاری دمایی خود را به‌طور متوسط ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دهند.

**واژگان کلیدی:** آبسنگ‌های مرجانی، گرمایش جهانی، دمای سطح آب، خلیج فارس.

### مقدمه

آبسنگ‌های مرجانی در حال حاضر بزرگ‌ترین ساختارهای زیست‌شناختی زمین می‌باشند و هزاران سال طول کشیده است تا تشکیل شوند، بالین وجود، اکوسیستم آبسنگ‌های مرجانی در دهه‌های اخیر، به میزان هشداردهنده‌ای در سرتاسر جهان رو به کاهش بوده است. سفید شدگی مرجان‌ها که یکی از نمایه‌های از بین رفتن تعادل اکوسیستمی آبسنگ‌های مرجانی است، یکی از مهم‌ترین علل کاهش و مرگ‌ومیر آبسنگ‌های مرجانی در سراسر جهان بوده است (Wilkinson, 2008). درواقع فرایند تشکیل آبسنگ‌های مرجانی ماحصل همزیستی نوعی از تک‌سلولی‌های تاژک‌دار به نام زوگزانتله (Zooxanthellae) با مرجان‌ها است. ارتباط بین جلبک تک‌سلولی زوگزانتله و آبسنگ‌های مرجانی یک ارتباط همزیستی است بدین معنی که این جلبک‌ها فتوسنتز می‌کنند و برای آبسنگ اکسیژن، انرژی و مواد مغذی تأمین می‌کنند و علاوه بر این با ترکیب کربنات کلسیم، اسکلت کلسیمی آبسنگ‌ها را نیز تشکیل می‌دهند، در مقابل آب سنگ‌ها برای این جلبک‌های تک‌سلولی محیطی برای رشد و همچنین نیتروژن، فسفر و دی‌اکسید کربن فراهم می‌کنند. اهمیت اکولوژیکی این مرجان‌ها از این لحاظ است که حیات تعداد

خاطره اژدری معموره<sup>۱</sup>

امیر گندمکار<sup>۲</sup>

کیوان کبیری<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد،

دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲. استادیار گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه

آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳. گروه سنجش‌ازدور، پژوهشگاه ملی

اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات:

aagandomkar@iaun.ac.ir

کد مقاله: ۱۳۹۷۰۳۰۶۷۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

این مقاله برگرفته از رساله دکتری است.

زیادی از گونه‌های دریایی از جمله انواع ماهی‌ها، به وجود و زنده‌بودن این مرجان‌ها بستگی مستقیم دارد که این ماهی‌ها خود سرفصل زنجیره غذایی مهمی در محیط اقیانوس محسوب می‌شوند. از این رو هرگونه تخریب و یا مرگ‌ومیری در مرجان‌ها می‌تواند کل گونه‌های زنده دریایی و پیرو آن حیات بسیاری از موجودات زنده خشکی زی (از جمله انسان‌ها) را تحت تأثیر قرار دهد. بزرگ‌ترین و مهم‌ترین جامعه مرجانی جهان بانام حصار بزرگ مرجانی (Great Barrier Reef) در اطراف استرالیا واقع شده است که می‌توان اثر آن را در محیط‌زیست اقیانوس‌ها با تأثیر جنگل آمازون در محیط‌زیست خشکی مقایسه کرد (Li et al., 2012). حیات ۲۵ درصد آبزیان مستقیم یا غیرمستقیم به آب سنگ‌های مرجانی وابسته است و زندگی بیش از نیم میلیارد نفر از مردم جهان که در مناطق ساحلی زندگی می‌کنند هم به این آبنگ‌ها متکی است. صخره‌های مرجانی در تعادل بخشیدن به میزان کربن و نیتروژن، حفظ خطوط ساحلی در برابر تخریب ناشی از هجوم مداوم امواج، طوفان و سیل، ایجاد محیط‌زیست دریایی و همچنین مواد مغذی برای زنجیره غذایی و همچنین تعادل بخشیدن به سیستم ظرفیت طبیعت نقش اساسی دارند (Bruno et al., 2007). در آب‌های جنوب ایران محیط‌هایی هرچند اندک و پراکنده از آبنگ‌های مرجانی وجود دارد که عمدتاً در اطراف جزایر خلیج فارس و تا حدودی نیز در خلیج چابهار قرار گرفته‌اند. در دو دهه اخیر به دلایل متعدد زیست‌محیطی و انسانی، فرایند تخریب و مرگ‌ومیر مرجان‌ها روند افزایشی معنی‌داری داشته است. یکی از مهم‌ترین علل مرگ‌ومیر مرجان‌ها فرایند سفید شدگی (Bleaching) مرجان‌ها است (Berkelmans and Willis, 1999) که زمانی رخ می‌دهد که رابطه هم‌زیستانه بین این تک‌سلولی و آبنگ‌های مرجانی میزبان آن‌ها طی فشارهای اقلیمی و زیست‌محیطی از بین برود در نتیجه میزبان که همان آبنگ مرجانی است، زوگراتلای خود را دفع کرده و در نتیجه آن اسکلت کربنات کلسیم سفید شده آن نمایان می‌شود و سیکل تغذیه مرجان مختل شده و مرجان دچار قحطی می‌گردد و در صورت تداوم، فرایند بدون بازگشتی به نام مرگ رخ می‌دهد (Lesser, 2011). تغییرات آب و هوایی ناشی از گرمایش جهانی که به صورت ملموسی از سال ۱۹۳۰ شروع شده است، در ۵۰ سال اخیر تشدید شده و اثرات وسیع‌الطیف زیست‌محیطی آن در ابعاد مختلف ظاهر شده است که یکی از این ابعاد بالا رفتن میانگین دمای آب‌های اقیانوس‌ها، افزایش فراوانی امواج گرم و سرد شدید در دمای هوا و آب است (Kavousi et al., 2014). این افزایش دمای آب‌ها که یکی از معلول‌های گرمایش جهانی است، منجر به ایجاد، تشدید و تسریع فرایند سفید شدگی و مرگ‌ومیر مرجان‌ها شده است (Wilkinson, 2008). افزایش آنتروپی حرارتی که در دهه اخیر در غالب بخش‌های جنوبی کشور باعث ثبت رکوردهای دمایی در ۵۰ سال اخیر شده است، به دنبال آن افزایش فراوانی رخداد دماهای حدی گرم (امواج گرم و ابر گرم در تابستان) و دماهای حدی سرد (امواج سرد در زمستان) آنومالی‌های دمایی شدیدی در دمای آب خلیج فارس ایجاد کرده است و فرایند سفید شدگی مرجان‌ها را تشدید کرده است (Coles and Riegl, 2013). مرجان‌ها زمانی در معرض سفید شدن آسیب‌پذیر می‌شوند که دمای آب دریا بیشتر از دماهایی باشد که معمولاً در گرم‌ترین ماه (ماه تیر) تجربه می‌کنند (Li et al., 2012). خلیج فارس نیز به‌عنوان یکی از محصورترین محیط‌های زیست دریایی و زیستگاه مرجان‌ها شناخته می‌شود (Sheppard et al., 2010). وقایع مخرب مربوط به سفید شدگی مرجان‌ها در خلیج فارس مانند سایر نقاط جهان در سه دهه اخیر رخ داده است. (Goudie, 2005; Wilkinson, 2008; Riegl et al., 2011). خلیج فارس یک دریای قاره‌ای کم‌عمق و نیمه بسته‌ای است. این خلیج با دمای آبی که از ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد و شوری آبی که از ۲۸ تا ۶۰ بخش در میلیون در نوسان است در معرض نوسانات گسترده‌ی آب و هوایی نیز می‌باشد. اثر هم‌افزای افزایش دماها و افزایش شوری آب دریا باهم در دو دهه اخیر تنش بی‌سابقه‌ای را به اکوسیستم‌های مرجانی خلیج فارس وارد کرده است (Rezai et al., 2010). زمانی که در تابستان دمای سطح آب اگر به‌طور مداوم مدتی به اندازه ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از میانگین حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال همان منطقه باشند یا دمای تابستانی آب منطقه ۴ الی ۸ درجه سانتی‌گراد از میانگین دمای سطح آب‌های آزاد بالاتر باشد، می‌تواند هشدار برای آغاز فرایند سفید شدگی باشد (Baker et al., 2008). در حال حاضر مرجان‌های خلیج فارس دماهایی را تجربه می‌کنند که انتظار می‌رود مرجان‌های سایر نقاط جهان تا سال ۲۰۹۹، با آن روبرو شوند (IPCC, 2014). مرجان‌های خلیج فارس هم‌اکنون از عهده دماهای پیش‌بینی‌شده برای مرجان‌های سایر نقاط در آینده برمی‌آیند و دمای

تابستان را تا چندین درجه سانتی‌گراد بالاتر تحمل کنند (Coles and Riegl, 2013). با این وجود در برابر بی‌نظمی‌های دما و تأثیرات بلندمدت آن آسیب‌پذیرند (Donner *et al.*, 2009). مطالعه Baker همکاران (۲۰۰۸)، در زمینه مدل‌سازی تأثیر روندهای دمایی بر میزان سفید شدگی آب سنگ‌ها بیانگر آن بود که دمای آستانه آغاز فرایند سفید شدگی ۲ درجه بالاتر از دمای بیشینه گرم‌ترین ماه سال با تداوم دو هفته است. Kabiri و Moradi (۲۰۱۴) از روش درجه گرمای هفتگی برای پیش‌بینی حوادث سفید شدن در جوامع مرجانی جزیره کیش استفاده کرده است و آستانه‌های درجه گرمای هفتگی را به‌عنوان هشدار برای پیش‌بینی سفید شدگی در منطقه مورد مطالعه معرفی کرده و سپس با استفاده از تکنیک پیرس کیفیت پیش‌بینی‌ها را در قالب اعداد و ارقام مورد ارزیابی قرار داده است. Tracy و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که فرایند تخریب و مرگ‌ومیر مرجان‌ها، برآیند پیچیده‌ای از عوامل انسانی و تغییر اقلیم و تغییر ویژگی‌های شیمیایی آب است. Dutra و همکاران (۲۰۱۸) بررسی تأثیرات گرمایش جهانی بر جوامع مرجانی اقیانوس آرام را مورد بررسی قرار داده‌اند، ایشان مشاهده کردند که تغییر اقلیم در کنار عوامل متعدد دیگری که غالباً منشأ انسانی دارند، می‌توانند، مهم‌ترین علت تخریب جوامع مرجانی باشند. هدف از این پژوهش بررسی میزان سازگاری مورد نیاز آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در شرایط اقلیمی سال ۲۰۹۹ است.

## مواد و روش‌ها

در شکل ۱ جزایر مرجانی مورد مطالعه در شمال و جنوب خلیج فارس ارائه شده است. جزیره کیش در بخش شمالی خلیج فارس و جزایر شمالی امارات متحده عربی در بخش جنوبی خلیج فارس به‌عنوان نمونه‌های موردی جزایر مرجانی خلیج فارس در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دمای معمول آب در اطراف این جزایر (کیش و جزایر شمالی امارات) بین ۲۲ تا ۳۳ درجه سانتی‌گراد است. در حالی که در تابستان‌های بسیار گرم این میزان به ۳۵ درجه و یا بیشتر نیز می‌رسد. میانگین کمینه‌های دمای هوای منطقه مورد مطالعه در زمستان ۱۵ و میانگین بیشینه‌های دما در تابستان ۳۸ درجه سانتی‌گراد است. مرجان‌های خلیج فارس تا اندازه زیادی محدود به جزیره‌ها هستند. بیش‌ترین مناطق مرجانی ایران در خلیج فارس در اطراف جزایر خارک و خارکو در شمال و اطراف جزایر جنوبی بین لاوان تا هرمز از جمله جزایر هندورابی، کیش، فارور، بنی‌فارور، سیری، لارک، هنگام، تنب کوچک و بزرگ، ابوموسی و قشم واقع شده‌اند. آبسنگ‌های مرجانی ایران عمدتاً از نوع حاشیه‌ای بوده و از شمال غرب به جنوب شرق خلیج فارس، در اطراف ۱۶ جزیره و دو منطقه ساحلی، یعنی خلیج نایبند و خلیج چابهار رشد کرده‌اند. مرجان‌های این منطقه شامل سه گروه ۱ (گونه‌های آکروپورا، ۲) گونه‌های سخت پورایت ها و ۳) گونه‌های تلفیقی می‌باشند (Rezai *et al.*, 2010).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه.

در این تحقیق از دودسته داده اصلی استفاده گردید: داده‌های حرارتی مربوط به دمای سطح آب (SST) و داده‌های حرارتی مربوط به دمای هوا و دسته دوم داده‌های مربوط به پایگاه اطلاعات آبنگ‌های مرجانی. داده‌های دمایی مورد استفاده در این تحقیق از پایگاه اقلیمی مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت هواشناسی (ECMWF) نسخه Era-Intrim برای دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۱۷ با رزولوشن فضایی ۰/۱۲۵ درجه قوسی به تفکیک ماهانه اخذ گردید (جدول ۱). داده‌های شبیه‌سازی شده سری زمانی دوره تغییر اقلیم (۲۰۱۸-۲۰۹۹) نیز از پایگاه اقلیمی مرکز ملی محیط‌زیست کانادا به دست آمد. مدل تغییر اقلیم HADCM3 که یک مدل جفت شده جوی اقیانوسی است و در سال ۲۰۰۰، در مرکز هدی هواشناسی انگلیس توسعه داده شد. این مدل ۳۲ برای شبیه‌سازی دمای هوا در دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۹۹ در این تحقیق استفاده شد. رزولوشن فضایی این مدل برای خشکی‌ها، ۲/۵ در ۳/۵ درجه و برای سطوح اقیانوسی ۱/۲۵ درجه است. این مدل دارای ۱۹ سطح تراز جوی و ۴ تراز عمق خاک است. در این تحقیق از سناریوی A2 که سناریوی بدبینانه مدل است استفاده گردید.

جدول ۱: عناصر اقلیم‌شناختی مورد استفاده.

| منبع                                 | دقت فضایی                           |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| دمای سطح آب (دوره پایه)              | ECMWF-Era-Intrim                    |
| دمای هوای ارتفاع دو متری (دوره پایه) | ECMWF-Era-Intrim                    |
| دمای هوا دوره تغییر اقلیم            | مرکز تغییر اقلیم کانادا- مدل HADCM3 |
|                                      | ریز مقیاس نمایی شده توسط SDSM       |

از آنجاکه در خروجی مدل گردش عمومی جو پارامتر دمای سطح آب یا SST وجود ندارد و درواقع این عامل مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در سفید شدگی آبنگ‌های مرجانی است، لذا در این تحقیق ابتدا با استفاده از توسعه یک مدل مبتنی بر تحلیل همبستگی و سپس رگرسیون، اقدام به تعمیم یک رابطه موثق و معنی‌دار در سطح اطمینان ۰/۹۵ ( $P\_value = ۰/۰۵$ ) بین دمای هوا و دمای سطح آب بر پایه داده‌های دوره پایه

یعنی ۱۹۸۲-۲۰۱۷ گردید. سپس با اجرای این مدل بر اساس داده‌های دوره تغییر اقلیم و جایگزینی داده‌های دمای هوای دوره ۲۰۱۸-۲۰۹۹، دمای سطح آب برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۹۹ در سطح اطمینان ۰/۹۵ ( $P\_value = ۰/۰۵$ ) شبیه‌سازی گردید. برای پایش سفید شدگی آب سنگ‌ها از شاخص درجه گرمایی ماه (Degree Heating Month) استفاده گردید. یک درجه گرمایی ماه عبارت از میزان ۱ درجه دمای بالاتر آب نسبت به میانگین دمای بلندمدت همان ماه. به‌صورت تجربی آستانه ۲ DHM را آستانه شروع فرایند سفید شدگی در نظر می‌گیرند و آستانه ۴ DHM نیز به‌عنوان آستانه شروع فرایند مرگ آبسنگ‌ها در نظر گرفته می‌شود.

## نتایج

از آنجاکه در خروجی مدل گردش عمومی جو پارامتر دمای سطح آب وجود ندارد لذا در اولین مرحله اقدام به توسعه مدل برآوردگر دمای سطح آب بر اساس داده‌های اقلیمی دوره پایه یعنی ۱۹۸۲-۲۰۱۷ گردید. تا بر اساس آن مدل، در دوره تغییر اقلیم، داده‌های دمای سطح آب را با استفاده از داده‌های دمای هوای ارتفاع دو متری دوره ۲۰۱۸-۲۰۹۹ که در خروجی مدل HADCM3، وجود دارد، بازیابی نمود. در جدول ۲ ماتریس همبستگی بین میانگین دمای هوای ارتفاع دو متری و دمای سطح آب Era-Intrim با رزلوشن ۰/۱۲۵ درجه قوسی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در همه ماه‌های موردبررسی یعنی خرداد تا شهریور همبستگی معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۹۵ بین دمای سطح آب و دمای ارتفاع دو متری هوا برقرار است.

**جدول ۲: ماتریس همبستگی سری زمانی دمای هوای ارتفاع دو متری و دمای سطح آب در دوره پایه (۱۹۸۲-۲۰۱۷) بر اساس داده‌های حرارتی پایگاه ECMWF.**

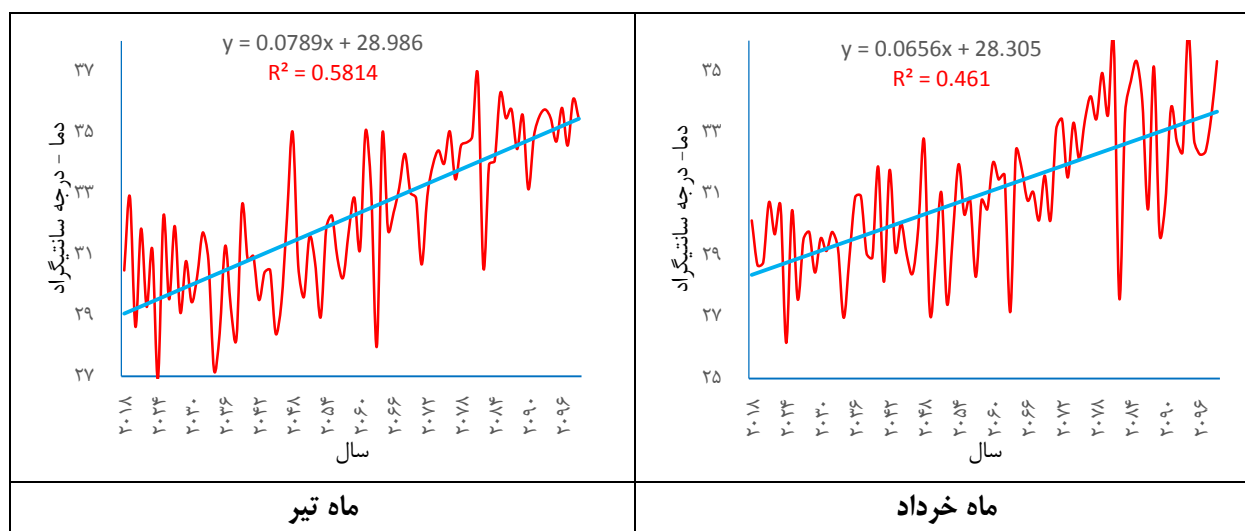
| همبستگی | Sig  |       |
|---------|------|-------|
| خرداد   | ۰/۷۸ | ۰/۰۱  |
| تیر     | ۰/۸۲ | ۰/۰۰۸ |
| مرداد   | ۰/۸۶ | ۰/۰۰۸ |
| شهریور  | ۰/۷۴ | ۰/۰۱  |

بعد از اثبات وجود همبستگی معنی‌دار بین دمای هوا و دمای سطح آب در سطح اطمینان ۰/۹۵ اقدام به توسعه مدل‌های برآوردگر دمای سطح آب برای شبیه‌سازی دمای سطح آب در دوره تغییر اقلیم گردید. در جدول ۳ مدل‌های توسعه داده شده برآوردگر دمای سطح آب ارائه شده است.

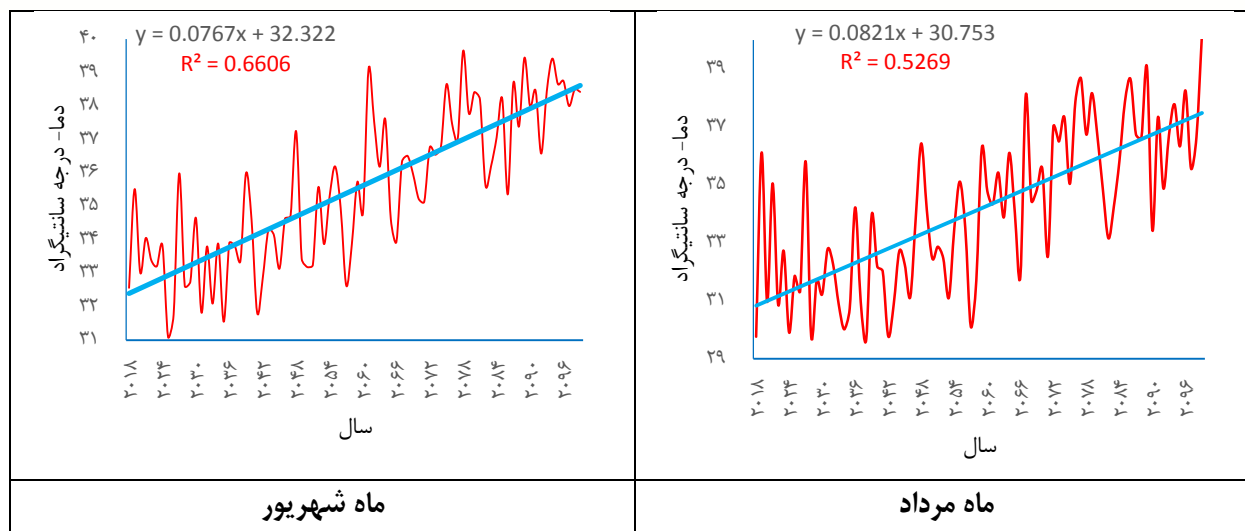
**جدول ۳: مدل‌های برآوردگر دمای سطح آب بر اساس دمای هوای ارتفاع دو متری در دوره پایه (۱۹۸۲-۲۰۱۷) بر اساس داده‌های حرارتی پایگاه ECMWF.**

| ضریب برآوردگر (آلفا) | پارامتر عرض از مبدأ (بتا) | ضریب تعیین |        |
|----------------------|---------------------------|------------|--------|
| ۰/۷۶                 | ۵/۵                       | ۰/۶۱       | خرداد  |
| ۰/۶۲                 | ۵/۸                       | ۰/۶۷       | تیر    |
| ۰/۴۹                 | ۴/۲                       | ۰/۷۴       | مرداد  |
| ۰/۴۳                 | ۴/۶                       | ۰/۵۵       | شهریور |

با به دست آوردن مدل برآوردگر دمای سطح آب بر اساس داده‌های دمای هوای ارتفاع دو متری، با قرار دادن دمای هوای شبیه‌سازی شده دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۸ خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3، تحت سناریوی بدینانه A2، دمای سطح آب خلیج فارس طی دوره آماری ۲۰۹۹-۲۰۱۸ به دست آمد. در نمودارهای شکل ۲ سری زمانی شبیه‌سازی شده دمای سطح آب خلیج فارس برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور ارائه شده است. مشخصات آماری سری زمانی دمای سطح دریای شبیه‌سازی شده دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۸، در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد، میانگین دمای ماه خرداد ۳۱ درجه سانتی‌گراد برخورد شده است که به‌طور متوسط با ۲/۳ درجه سانتی‌گراد تغییرپذیری سالانه همراه است. دمای سطح آب خلیج فارس در این ماه در دوره آماری ۲۰۹۹-۲۰۱۸ با شیب سالانه ۰/۰۶۸ درجه سانتی‌گراد روند افزایشی نشان داده است که بر اساس آماره تحلیل روند ناپارامتریک من کندال، این روند در سطح اطمینان ۰/۹۵ معنی‌دار نبوده است. در ماه تیر میانگین دمای سطح آب خلیج فارس در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۸، برابر ۳۲/۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود که با ۲/۲ درجه سانتی‌گراد تغییرپذیری همراه است. روند سری زمانی دمای میانگین این ماه برابر ۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد در سال می‌باشد که در سطح اطمینان ۰/۹۵ بر اساس آماره ناپارامتریک من-کندال معنی‌دار نبوده است. میانگین دمای ماه مرداد نیز همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، برابر ۳۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود که با ۲/۸ درجه سانتی‌گراد تغییرپذیری سالانه همراه است، دمای این ماه نیز بر اساس خروجی مدل HADCM3، تحت سناریوی بدینانه A2، با شیب ۰/۰۸۶ درجه سانتی‌گراد در سال روند افزایشی معنی‌داری داشته است.







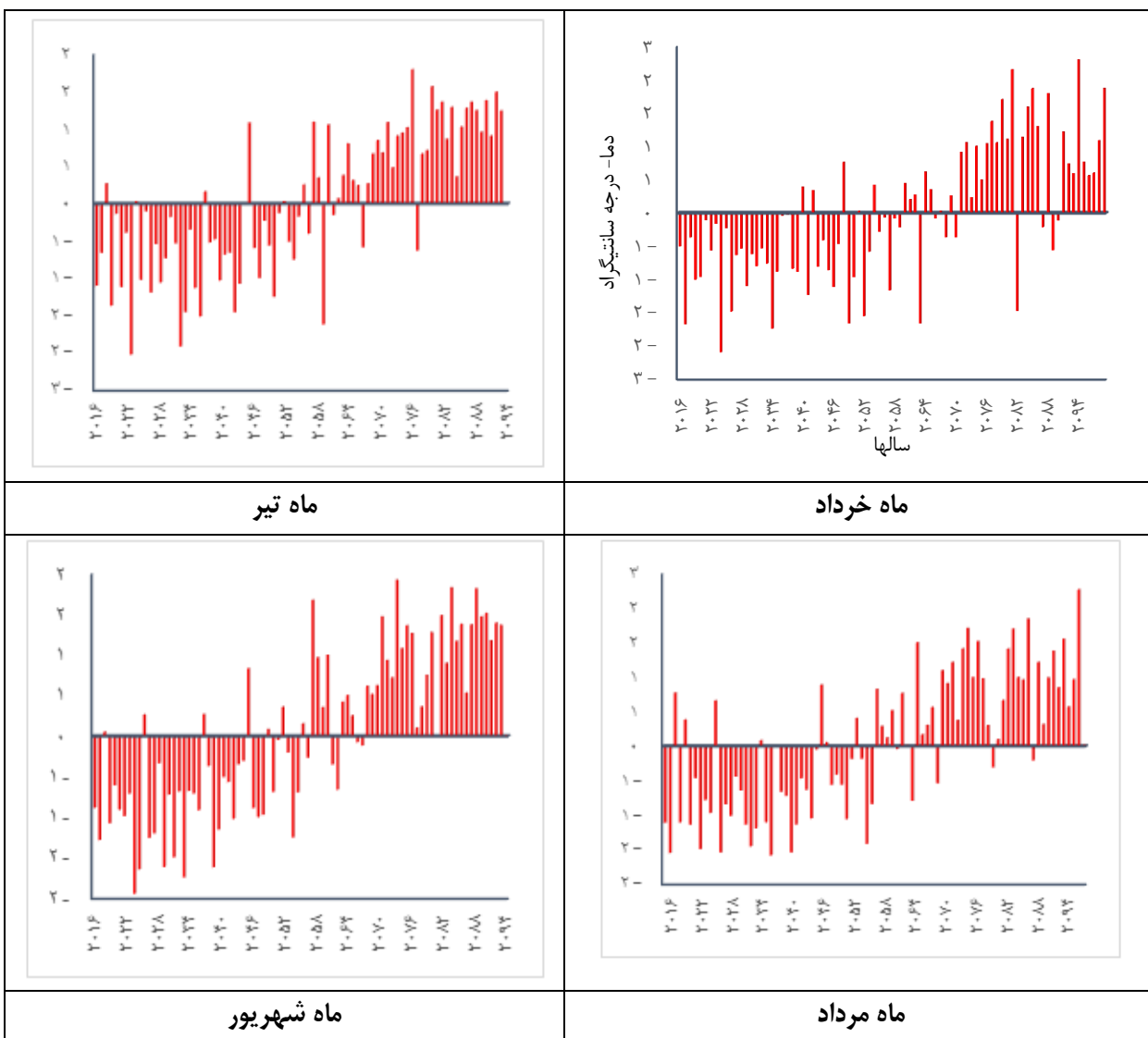
شکل ۲: میانگین دمای سطح آب خلیج فارس در ماه‌های مورد بررسی در دوره ۲۰۱۸-۲۰۹۹ مبتنی بر داده‌های خروجی مدل HADCM3.

در نهایت میانگین دمای سطح آب خلیج فارس در ماه شهریور به بالاترین حد خود یعنی ۳۵/۴ درجه سانتیگراد رسیده است که ۲/۳ درجه تغییرپذیری سالانه داشته است. در این ماه نیز میانگین دما با یک شیب ملایم‌تر نسبت به ماه مرداد، یعنی ۰/۰۷۶ درجه سانتیگراد در سال، روند افزایشی داشته است.

جدول ۴: میانگین دمای سطح آب خلیج فارس در ماه خرداد در دوره ۲۰۱۸-۲۰۹۹ مبتنی بر داده‌های دمای هوای ارتفاع دو متری خروجی مدل HADCM3.

| میانگین بلندمدت | انحراف معیار | روند (Q) | آماره معنی‌داری روند (Sig) | در سطح اطمینان ۰/۹۵ |
|-----------------|--------------|----------|----------------------------|---------------------|
| ۳۱              | ۲/۳          | ۰/۰۶۵    | ۱/۳۸                       | خرداد               |
| ۳۲/۲            | ۲/۵          | ۰/۰۸     | ۲/۰۲                       | تیر                 |
| ۳۴              | ۲/۸          | ۰/۰۸۲    | ۲/۱۲                       | مرداد               |
| ۳۵/۴            | ۲/۳          | ۰/۰۷۶    | ۱/۹۹                       | شهریور              |

در نمودارهای شکل ۳ سری زمانی آنومالی‌های سالانه دمای شبیه‌سازی شده سطح آب بر اساس توزیع نرمال (میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی شده سری زمانی دمای سطح آب خلیج فارس در دوره تغییر اقلیم) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در ماه خرداد این آنومالی از سال ۲۰۷۰ به بعد شروع شده است و به صورت پیوسته ادامه داشته است. در ماه تیر که میانگین دمای دوره ۳۲/۲ درجه بوده است، آنومالی‌های افزایشی دمای سطح آب خلیج فارس از سال ۲۰۶۶ به بعد شروع شده است و به صورت پیوسته ادامه داشته است. در دو ماه مرداد و شهریور که دمای سطح آب به ترتیب ۳۴ و ۳۵/۴ درجه سانتیگراد بوده است، آنومالی‌های افزایشی دمای آب، از سال ۲۰۶۶ شروع شده است و به صورت پیوسته ادامه داشته است.



شکل ۳: آنومالی‌های دمای سطح آب خلیج فارس در ماه‌های مورد بررسی در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۸ مبتنی بر داده‌های خروجی مدل HADCM3.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، میانگین دمای دوره تغییر اقلیم (۲۰۹۹-۲۰۱۸) در همه ماه‌های مورد بررسی بالاتر از ماه‌های میانگین دوره پایه (۱۹۸۲ تا ۲۰۱۷) بوده است. به‌طوری‌که در ماه خرداد میانگین دمای سطح آب از ۲۹/۷ درجه سانتی‌گراد در دوره پایه (میانگین دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۷) به ۳۱ درجه سانتی‌گراد در دوره تغییر اقلیم (میانگین دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۸) رسیده است که گویای ۱/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای سطح آب می‌باشد. در ماه تیر، بیشترین افزایش در میانگین دما مشاهده شده است که برابر ۲ درجه سانتی‌گراد بوده است به‌طوری‌که میانگین دما از ۳۰/۲ به ۳۲/۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در ماه‌های مرداد و شهریور میانگین دما به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است.

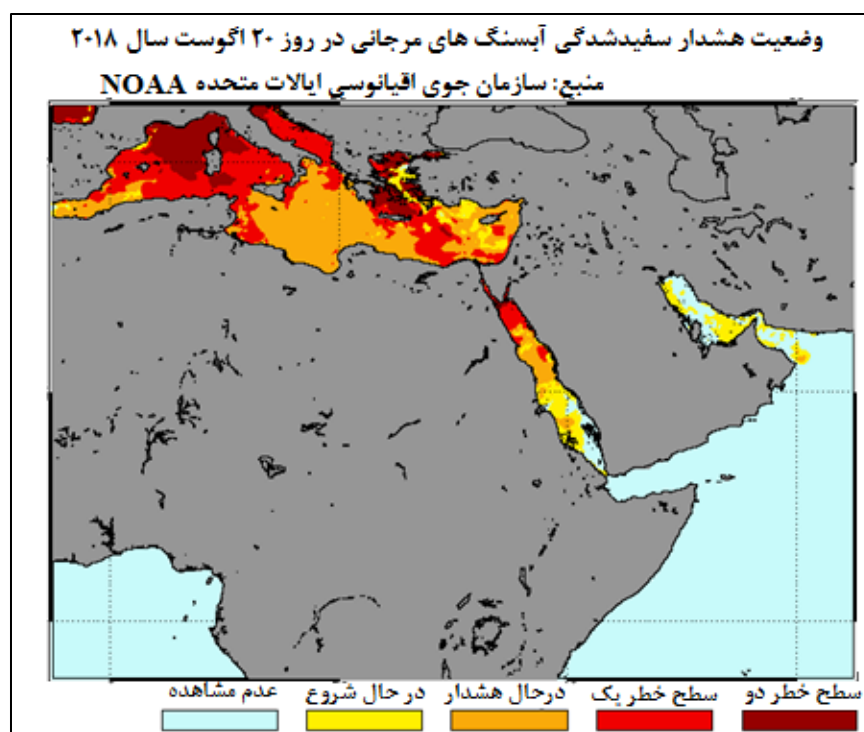


جدول ۵: مقایسه میانگین دمای سطح آب خلیج فارس دوره پایه (۱۹۸۲-۲۰۱۷) و دوره تغییر اقلیم (۲۰۱۸-۲۰۹۹)

خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی بدبینانه A2.

| میانگین دوره تغییر اقلیم | میانگین دوره پایه | تفاوت |        |
|--------------------------|-------------------|-------|--------|
| ۳۱                       | ۲۹/۷              | ۱/۳   | خرداد  |
| ۳۲/۲                     | ۳۰/۲              | ۲     | تیر    |
| ۳۴                       | ۳۲/۳              | ۱/۷   | مرداد  |
| ۳۵/۴                     | ۳۳/۵              | ۱/۹   | شهریور |

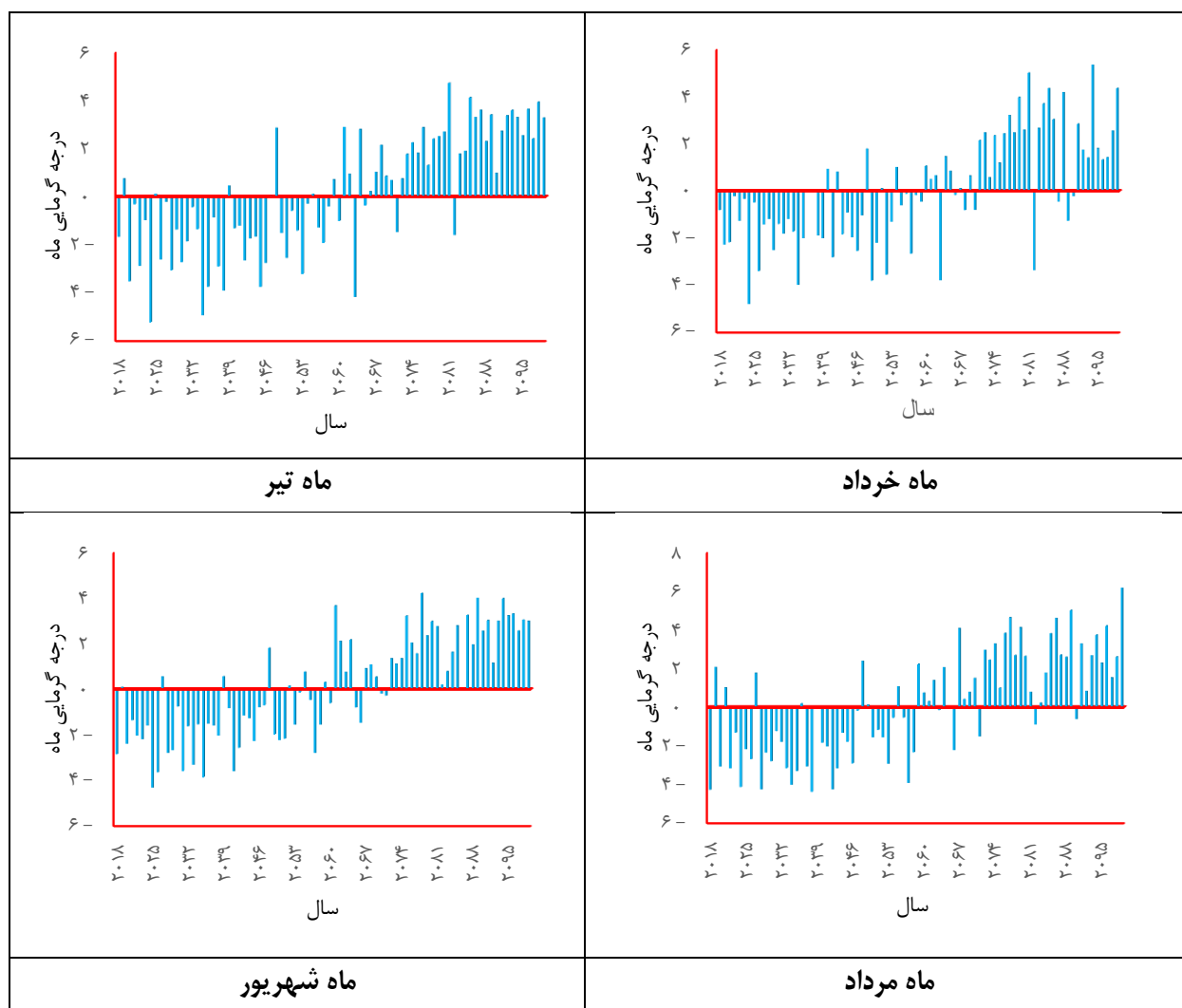
در شکل ۴ که میزان سفید شدگی ماه مرداد سال ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد، آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس در مرحله قابلیت شروع بوده است و مخاطره جدی مشاهده نشده است؛ اما با توجه به میزان افزایش دمای شبیه‌سازی شده خروجی مدل HADCM3 مشاهده گردید که از سال ۲۰۶۰ به بعد، میانگین دمای سطح آب به صورت معنی‌داری روند افزایشی به خود گرفته است. پیک استرس دمایی از سال ۲۰۶۰ به بعد بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل، در ماه‌های شهریور و سپس مرداد بر آبسنگ‌های خلیج فارس وارد خواهد شد.



شکل ۴: وضعیت سفید شدگی آبسنگ‌های منطقه خلیج فارس در مرداد سال ۲۰۱۸.

در نمودارهای شکل ۵ شاخص DHM مربوط به ماه‌های تیر تا شهریور برای دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۹۹ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، شاخص DHM که نمایه‌ای از شروع و شدت سفید شدگی آبسنگ‌ها و نهایتاً مرگ‌ومیر آن‌ها است، برای همه ماه‌ها نسبت به میانگین

همان ماه محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، در ماه خرداد طی دوره آماری ۸۰ ساله مورد بررسی (۲۰۱۸-۲۰۹۹)، در ۳۷ سال از سال‌های مورد بررسی شاخص DHM با میانگین DHM ۲/۱ بوده است که به معنی آن است طی ۳۷ خرداد از ۸۰ خرداد مورد بررسی، میانگین دمای سطح آب به‌طور متوسط ۲/۱ درجه سانتی‌گراد بالاتر از میانگین بلندمدت ماه خرداد بوده است. در ماه تیر طی ۸۰ سال مورد بررسی، در ۴۲ سال، در ماه تیر به‌طور متوسط میزان DHM برابر ۲/۱ درجه سانتی‌گراد دمای سطح آب بوده است بیشترین میزان DHM در این ماه مربوط به تیر سال ۲۰۸۱ بوده است که در آن سال ۴/۷ DHM وجود داشته است. در ماه‌های مرداد و شهریور نیز به ترتیب ۴۲ و ۴۱ سال از کل دوره مورد مطالعه، دمای سطح آب بالاتر از میانگین بلندمدت بوده است. بیشترین میزان DHM در ماه مرداد مربوط به مرداد سال ۲۰۹۹ با ۶/۹ DHM بوده است. در حالی که بیشینه این شاخص برای ماه شهریور برابر ۴/۲ DHM بوده است که در سال ۲۰۷۸ خواهد بود.



شکل ۵: سری زمانی شاخص DHM ماه‌های مورد بررسی طی دوره تغییر اقلیم (۲۰۱۸-۲۰۹۹) بر اساس داده‌های دمای سطح آب خلیج فارس خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی بدبینانه A2.

بنابر نتایج شاخص درجه گرمایی ماه، در ماه شهریور شدیدترین میزان درجه گرمایی ماه در سال ۲۰۷۸ روی داده است که در آن دمای آب خلیج فارس در ماه شهریور ۴/۲ درجه از میانگین بلندمدت بالاتر بوده است و در این صورت فرایند سفید شدگی به شدت صورت می‌گیرد و آستانه مرگ مرجان‌ها می‌باشد.

#### جدول ۶: مشخصات آماری سری زمانی شاخص DHM ماه‌های مورد بررسی طی دوره تغییر اقلیم (۲۰۱۸-۲۰۹۹) بر

اساس داده‌های دمای سطح آب خلیج فارس خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی بدبینانه A2.

| تعداد سال‌های با DHM مثبت | میانگین DHM | بیشینه DHM        |        |
|---------------------------|-------------|-------------------|--------|
| ۳۷                        | ۲/۱         | ۵/۴ برای سال ۲۰۸۱ | خرداد  |
| ۴۲                        | ۲/۱         | ۴/۷ برای سال ۲۰۸۱ | تیر    |
| ۴۲                        | ۲/۳         | ۶/۲ برای سال ۲۰۹۹ | مرداد  |
| ۴۱                        | ۲           | ۴/۲ برای سال ۲۰۷۸ | شهریور |

#### بحث و نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر روند نابودی و مرگ‌ومیر آبسنگ‌های مرجانی ناشی از مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی تسریع و تشدید شده است. در این میان نقش گرمایش جهانی بر ایجاد و تسریع فرایند مرگ‌ومیر آب سنگ‌ها، بسیار مهم است. افزایش دمای آب‌ها، باعث ایجاد استرس‌های حرارتی کشنده‌ای به آبسنگ‌های مرجانی می‌شود. این استرس‌های حرارتی در صورت تداوم در ابتدا باعث آغاز فرایند سفید شدگی و در صورت تداوم باعث مرگ مرجان خواهد شد. در این تحقیق با به‌کارگیری خروجی دمای هوای مدل گردش عمومی جو HADCM3 تحت سناریوی بدبینانه A2 و شبیه‌سازی دمای آب خلیج فارس طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۹۹ (۸۰ سال) اقدام به بررسی روند این سری زمانی و تأثیر آن بر آغاز و شدت فرایند سفید شدگی گردید. نتایج نشان‌دهنده آن بود دمای سطح آب خلیج فارس یک‌روند افزایشی معنی‌داری را طی دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۹۹ طی خواهد کرد به صورتی که میانگین دمای ماه‌های خرداد تا شهریور این دوره آماری به‌طور متوسط ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دمای همین ماه‌ها در دوره پایه (۱۹۸۲-۲۰۱۷) بوده است. این نتیجه در کار Chambault و همکاران (۲۰۱۸) نیز مشاهده گردید که میانگین دمای سطح آب در ناحیه شمالگان، به‌ویژه در ماه‌های تابستان، به‌صورت معنی‌داری طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۱۱ افزایش پیدا کرده بود. در این تحقیق مشاهده گردید که پیک افزایش دمای آب در ماه‌های شهریور و مرداد بوده است و در این دو ماه بیشترین استرس حرارتی روی کلونی‌های مرجانی وارد خواهد شد و ریسک اصلی سفید شدگی مرجان‌ها، تحت شرایط بدبینانه تغییر اقلیم، در ماه‌های مرداد و به‌ویژه شهریور وجود دارد. در این ماه‌ها میانگین دمای سطح آب بالاتر از ۳۳ درجه سانتی‌گراد (آستانه سفید شدگی آبسنگ‌ها) بوده است. Pramanik (۲۰۱۵)، نیز نشان داد که ریسک افزایش دمای سطح آب ناشی از گرمایش جهانی در بخش‌های جنوبی اقیانوس آرام ریسک جدی برای فرایند سفید شدگی آبسنگ‌های مرجانی به همراه دارد. ایشان اشاره دارند که با تشدید پدیده النینو در بخش‌های شرقی اقیانوس آرام و جزایر کارائیب، دمای این بخش‌ها از اقیانوس بالاتر رفته و ریسک سفید شدگی به میزان قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. در تحقیق حاضر مشاهده گردید که ریسک اصلی تخریب گسترده آبسنگ‌ها تحت مدل تغییر اقلیم HADCM3 و سناریوی بدبینانه A2، از سال ۲۰۶۰ به بعد آغاز می‌شود. از این سال به بعد به‌صورت پیوسته میانگین دمای سطح آب بخش شمالی خلیج فارس دارای آنومالی‌های گسترده افزایشی خواهد بود و تا سال ۲۰۹۹ که آخرین سال مدل می‌باشد، ادامه داشته است. تکرار فشار گرما ناشی از دماهای بالاتر از میانگین که در آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس، طبق نمودارهای دماهای شبیه‌سازی شده، با شدت اندک تا دهه ۲۰۳۰ و در دهه‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰ حداقل هر دو سال و در دهه ۲۰۶۰ تا ۲۰۹۹ هرساله رخ می‌دهد تکرار این فشارها در خلیج فارس، بیشتر از آستانه‌های سفید شدن آبسنگ‌های منطقه است. Bajjouka و همکاران (۲۰۱۹)

نشان دادند که در بخش‌های غربی اقیانوس آرام، نسبت آبنگ‌های زنده به کل آبنگ‌های موجود، در سال ۲۰۵۰، تحت شرایط تغییر اقلیم حدود ۰/۲۸ کاهش پیدا می‌کند. با توجه به دماهای سطح آب پیش‌بینی شده و با استفاده از روابط خطی، سفید شدن با شدت کمتر تا سال ۲۰۳۰ و به‌طور پراکنده و از دهه ۲۰۶۰-۲۰۹۹ با شدت بیشتر هر سال رخ می‌دهد. اگرچه نتایج این وقایع مکرر سفید شدگی به نوع گونه‌های مرجانی و ترکیب گروه‌های آن‌ها و سایر عوامل محلی دیگر بستگی خواهد داشت. فاصله بین وقایع سفید شدن و سایر اختلالات برای تجدید نیروی موفق و حفظ بلندمدت پوشش مرجانی بسیار مهم می‌باشد. دلیل اخیر نشان داده است که سفید شدن مکرر مرجان‌ها حتی اگر بدون مرگ‌ومیر آن‌ها باشد می‌تواند از طریق کند کردن رشد مرجان‌ها، کاستن تجدید نیروی مرجان‌ها، کاهش سازگاری با سایر اختلالات، منجر به تجزیه بلندمدت اکوسیستم آبنگ‌های مرجانی شود. بر اساس نتایج این تحقیق کلونی‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در دوره تغییر اقلیم تا سال ۲۰۶۰ با مشکل حادی روبرو نخواهند شد و قابلیت تحمل دمایی آن را در بدینانه‌ترین سناریو دارند درحالی‌که از سال ۲۰۶۰ به بعد به‌صورت پیوسته آنومالی‌های مثبت دمای سطح آب شروع شده و آبنگ‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در آن شرایط یعنی شرایط اقلیمی سال ۲۰۶۰ به بعد نیاز به این دارند که سطح سازگاری دمایی خود را به‌طور متوسط ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دهند.

## منابع

- Bajjouka, T., Mouquetb, P., Ropertc, M., Quodd, J., Ludovic, H., Bigotf, L., Le Dantecg, N., Delacourth, C. and Populus, J., 2019.** Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and and multispectral data. *Ecological Indicators*, 96: 174–191.
- Baker, A. C., Glynn, P. W. and Riegl, B., 2008.** Climate change and coral reef bleaching: an ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuaries and Coasts*. 80: 435–471.
- Berkelmans, R. and Willis, B., 1999.** Seasonal and local spatial patterns in the upper thermal limits of corals on the inshore Central Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 18: 219-228.
- Bruno, J. F., Selig, E. R., Casey, K. S., Page, C. A., Willis, B. L., Harvell, C. D., Sweatman, H. and Melendy, A. M., 2007.** Thermal stress and coral cover as drivers of coral disease outbreaks. *Public Library of Science Biology*, 5: 1-8.
- Chambault, P., Moesgaard, C., Toby, A., Rikke, G., Tervo, O., Laidre, K. L. and Peter, H.M., 2018.** Sea surface temperature predicts the movements of an Arctic cetacean: the bowhead whale. *Scientific Reports*, 8: 70-86.
- Coles, S. L. and Riegl, B. M., 2013.** Thermal tolerances of reef corals in the Gulf: A review of the potential for increasing coral survival and adaptation to climate change through assisted translocation. *Marine Pollution Bulletin*. 72: 323-332.
- Donner, S., Heron, S. and Skirving, W., 2009.** Future scenarios: a review of modeling efforts to predict the future of coral reefs in an era of climate change. In: van Oppen MJH, Lough JM, editors. *Coral Bleaching*. Berlin: Springer, *Ecological Study*, 205: 159–173.
- Dutra, L., Haywood, M., Singh, S. S., Ferreira, M., Johnson, J., Joeli, V., Kininmonth, S., Morris, C. W., 2018.** Impacts of Climate Change on Corals Relevant to the Pacific Islands. *Pacific Marine Climate Change Report Card: Science Review*, 11:132-158.
- Goudie, D., 2005.** Sustainability planning: pushing against institutional barriers. In: Tiezzi, E., Brebbia, C.A., Jorgensen, S.E., and Almorza Gomar, D., (eds.) *Ecosystems and Sustainable Development V*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, WIT Press, Southhampton, UK, pp. 215-224.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014.** Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group II contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press pp. 279-298.

- Kabiri, K. and Moradi, M., 2014.** Historical Remotely Sensed Sea Surface Temperature Data for Prediction of Coral Bleaching Event in Kish Island, the Persian Gulf. *Journal of the Persian Gulf*, 5: 50-55.
- Kavousi, J., Tavakoli-Kolour, P., Mohammadizadeh, M., Bahrani, A., Barkhordari, A., 2014.** Mass coral bleaching in the northern Persian Gulf, 2012. *Scientia Marina* 78: 397-404.
- Lesser, M. P., 2011.** Coral Bleaching: Causes and Mechanisms. In: Dubinsky Z., Stambler N. (eds), *Coral Reefs: an ecosystem in transition*. Springer Science, New York, pp. 405-419.
- Li, Y., Lee, S-K., Muhling, B. A., Lamkin, J. T., Enfield, D. B., 2012.** Significant reduction of the Loop Current in the 21st century and its impact on the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 117: 39-50.
- Pramanik, M., 2015.** Climate Change and Sea Surface Temperature: Modelling the Effects on Coral Bleaching, *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 2:5-9.
- Rezai, H., Samimi, K., Kabiri, K., Kamrani, E., Jalili, M., Mokhtari, M., 2010.** Distribution and abundance of the corals around Hengam and Farurgan islands, the Persian Gulf. *Journal of the Persian Gulf* 1: 7-16.
- Riegl, B. M., Purkis, S. J., Al-Cibahy, A. S., Abdel-Moati, M. A., Hoegh-Guldberg, O., 2011.** Present limits to heat-adaptability in corals and population-level responses to climate extremes. *PLoS* 6: 70-82.
- Sheppard, C., Al-Husiani, M., Al-Jamali, F., Al-Yamani, F., Baldwin, R., Bishop, J., Benzoni, F., Dutrieux, E., Dulvy, N., Durvasula, S., Jones, D., Loughland, R., Medio, D., Nithyanandan, M., Pilling, G., Polikarpov, I., Price, A., Purkis, S. Riegl, B. Saburova, M. Namin, K., Wilson, O. And Zainal, K., 2010.** The Gulf: A Young Sea in Decline, *Marine Pollution Bulletin*, 60: 3-38.
- Tracy, D., Scott F., Juan C., Peter, J., Alana G., Daisie, O., Mark E., Willi, E., 2016,** Climate change disables coral bleaching protection on the Great Barrier Reef , 352: 338-342.
- Wilkinson, C., 2008.** Status of Coral Reefs of the World: 2008 Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Center. Townsville, Australia, p, 269.

پیش‌بینی سطح سازگاری موردنیاز آبسنگ‌های مرجانی خلیج فارس برای بقا در شرایط تغییر اقلیم در سال ۲۰۹۹ / اژدری معموره و همکاران