



بررسی تأثیر دمای سطح دریا در پیش‌بینی وقایع سفید شدن مرجان‌های خلیج فارس

زهرا صیادی^۲

حشمت کرمی^۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

چکیده

صخره‌های مرجانی از نظر محیط زیستی جزء مهم‌ترین مناطق جهان هستند. در چند دهه اخیر این بوم‌سازگان با افزایش دمای اقیانوس‌ها به شدت توسط رویداد سفید شدن تهدید می‌شوند. با سفید شدن صخره‌های مرجانی این بوم‌سازگان تحت تنش بیشتری قرار گرفته و در معرض مرگ و میر قرار خواهند گرفت. امروزه به منظور پیش‌بینی و شناسایی مناطق در معرض خطر سفید شدن مرجان‌ها از داده‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور ماهواره‌ای و قابلیت‌های تحلیل روند استفاده می‌شود. در این پژوهش سعی شد با استفاده از روند داده‌های ۳۵ ساله در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ در قالب داده‌های چندبعدی، دمای سطح دریا در سال ۲۰۲۲ با به‌کارگیری ابزارهای ArcGIS Pro برای محدوده خلیج فارس پیش‌بینی شود و مناطقی که بیشتر در معرض تنش حرارتی منجر به سفید شدگی هستند شناسایی شوند. در این تحلیل برای برازش خط روند از روش هارمونیک استفاده شد. خط روند هارمونیک خطی منحنی است با تکرار دوره‌ای که بهترین استفاده را برای توصیف داده‌های دارای الگوی چرخه‌ای دارد. نتایج اولیه نشان داد که دمای سطح دریا در محدوده خلیج فارس از سال ۱۹۹۶ میانگین دمای بالاتری را تجربه کرده است. نقشه روند به‌دست‌آمده (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵)، بیانگر این بود که مناطق شمال غربی خلیج فارس و بخشی از جنوب آن بیشتر در معرض گرمای طولانی قرار دارند. دقت برازش روند داده‌ها توسط تابع رگرسیونی هارمونیک، پارامترهای آماری، $R^2 = 0/78$ و $RMSE = 0/5$ را ارائه داد. در این مطالعه، ناهنجاری‌های موجود در داده‌ها محاسبه شد و مناطقی که دمای بالاتر از میانگین داشتند شناسایی شدند. در برش زمانی سالانه پیش‌بینی شده (۲۰۲۲)، شمال غربی و بخشی از جنوب منطقه خلیج فارس با تنش حرارتی منجر به سفید شدگی مواجه می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده با نقشه‌های سازمان نوآ در همان تاریخ مقایسه شدند و مورد تأیید قرار گرفتند. پیشنهاد می‌شود تا سازمان‌های مسئول برای ارزیابی وضعیت و تهیه نقشه خطر محدوده‌های مرجانی از روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور و تحلیل روند استفاده کنند.

واژه‌های کلیدی: سفید شدن مرجان‌ها، تحلیل روند هارمونیک، سنجش‌ازدور، دمای سطح دریا، خلیج فارس

۱- کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، گرایش مطالعات آب و خاک، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا، دانشگاه هرمزگان (نویسنده مسئول) heshmat.0939@gmail.com

۲- کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، گرایش مطالعات آب و خاک، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا، دانشگاه هرمزگان sayadi.zahrah24@gmail.com

۱- مقدمه

IPCC^۱ تخمین زده است که ۹۰ تا ۹۹ درصد صخره‌های مرجانی جهان تا سال ۲۰۵۰ به دلیل گرم شدن اقیانوس‌ها از بین می‌روند (Kwiatkowski. 2015) و از آنجا که بازیابی صخره‌های مرجانی ممکن است بیش از یک دهه به طول بینجامد (Burt et al. 2008; Gilmour et al. 2013) در قرن بیست و یکم برای کاهش تأثیر عوامل استرس‌زا بر روی این بوم‌سازگان، به پیش‌بینی و مدیریت موفق صخره‌های مرجانی (Vardi et al. 2021) با استفاده از فناوری با هزینه‌ی کم و بدون به خطر انداختن کیفیت آب نیاز است (Possingham et al. 2015).

با ظهور علم سنجش از راه دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و گسترش علوم محاسباتی برآورد اطلاعات از ماهواره‌ها آسان‌تر شده است و این امر باعث شده است که در دهه‌های اخیر پیش‌بینی و مدل‌سازی سفید شدن صخره‌های مرجانی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مورد توجه محققان قرار گیرد. به عنوان مثال حلبیان و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از داده‌های تاریخی دمای سطح دریا، تأثیر تغییرات این عامل بر بوم‌سازگان‌های مرجانی جزیره کیش را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر روند افزایشی دمای سطح دریا (SST) بود است و عنوان کردند بین رویداد سفید شدگی صخره‌های مرجانی در سال‌های مختلف و سال‌های وقوع النینو همپوشانی وجود دارد و با استفاده از شاخص DHW سفید شدن جوامع صخره‌های مرجانی را پیش‌بینی کردند. (Barnes et al. 2015) با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون خطی داده‌های سرعت باد و دما ماهواره‌ای از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ فلوریدا روند سفید شدن صخره‌های مرجانی را پیش‌بینی کردند. (Wooldridge & Done. 2004) تأثیر عوامل مختلف بر سفید شدن صخره‌های مرجانی را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و میدانی مورد بررسی قرار دادند و تأثیر عوامل مختلف سفید شدن صخره‌های مرجانی در سال ۲۰۰۲ را پیش‌بینی کردند. (Boonnam et al. 2022) سفید شدن صخره‌های مرجانی را تحت تغییرات آب و هوایی در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ با

صخره‌های مرجانی منبع اصلی تنوع زیست دریایی هستند (Nguyen et al. 2021). در چند دهه اخیر روند افزایش گرم شدن جهان فعلی باعث افزایش گرمای آب‌های اقیانوسی شده است (fulton et al. 2020; Baird. 2020) و صخره‌های مرجانی نیز در سرتاسر جهان تحت تأثیر این تنش‌های گرمایش جهانی (Hughes. 2017) خیلی سریع در حال کاهش هستند. (Hughes et al. 2018; Wilkinson 2008) آسیب به صخره‌های مرجانی صدها میلیون بوم‌سازگان دیگر را به خطر می‌اندازد. (Franca et al. 2020) زیرا این صخره‌ها زیستگاه بسیاری از گونه‌ها و روابط همزیستی هستند (Gibson et al. 2011). این روابط همزیستی می‌تواند توسط تعداد بی‌شماری عوامل تنش‌زای محیطی مختل شود و باعث از بین رفتن رنگ مرجان‌ها (معروف به سفید شدن) شود (Xu et al. 2020). سفید شدن به عوامل متعددی نسبت داده شده است از جمله تغییرات و اختلالات آب و هوایی (Graham et al. 2020; Bruno et al. 2018) (مانند دمای بالا (Levin et al. 2016; Wyatt et al. 2019)، افزایش سطوح نور، (Downs et al. 2013) کاهش کیفیت آب، آلودگی آب (Lamb et al. 2019; Macneil et al. 2015) (مانند شوری (Ferrier—Ferrier-Pages et al. 2018; Pogoreutz et al. 2017) توفان‌های مکرر و شیوع بیماری (woodhead et al. 2019)، رسوبات و آلاینده‌ها (Allemand and Osborn. 2019) و اختلالات ناشی از فعالیت انسان (Orlando et al. 2008) (مانند ماهیگیری (Harborne et al. 2017)؛ اما شواهد، دمای بالا را به عنوان محرک اصلی سفید شدن صخره‌های مرجانی نشان می‌دهد. (Gardner et al. 2019; Wyatt et al. 2019). کاهش صخره‌های مرجانی به طور مستقیم روی خدماتی مانند حفاظت از ساحل، آبی‌پروری، قایق‌سواری، اقدامات فرهنگی و بوم‌گردی، ساخت داروهای جدید (Moberg and Folke 1999; Principe et al. 2012)، افزایش جلبک‌های بزرگ (Baker et al. 2008; Glynn, 2011; Loya et al. 2001) گردشگری و ماهیگیری (Fulton et al. 2020; Baird et al. 2020) et al. 2020) اقتصاد ملی، منطقه‌ای و محلی (van Beukering et al. 2011; Hoegh-Guldberg et al. 2019) تأثیر می‌گذارد.

۲۳ درجه و ۹۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه‌ی عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۷۰ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۳۳ دقیقه‌ی طول شرقی قرار دارد. عمیق‌ترین نقطه آن ۹۳ متر در ۱۵ کیلومتری تنب بزرگ، و کم‌عمق‌ترین بخش آن در غرب بین ۱۰ تا ۳۰ متر است. از نظر ژئومورفولوژی، نامتقارن و شیب ساحل جنوبی آن آرام‌تر از ساحل شمالی است (پارسا پور، ۱۴۰۱). خلیج فارس از نظر اقلیم خشک و نیمه‌گرمسیری است که با توجه به دمای بالای تابستان (بیش از ۳۴ درجه سانتی‌گراد)، شوری بالا (بیش از ۳۸ psu) و جزر و مد بسیار زیاد، سخت‌ترین شرایط محیطی را برای حضور جوامع مرجانی فراهم می‌کند (وجد سمیعی و همکاران، ۱۳۹۲؛ بلوکی کورنده و همکاران، ۱۴۰۰). تعداد گونه‌های آبسنگ‌های مرجانی شناسایی‌شده در آب‌های ایرانی خلیج فارس ۱۰۲ گونه است. عمده آبسنگ‌های مرجانی اطراف جزایر از عمق یک تا یک و نیم متری پایین‌تر از خط جزر آغاز، و با عرض یک تا دو کیلومتر در اطراف جزایر، تا عمق حداکثر حدود ۲۰ متری، در محل‌هایی که نور و سایر شرایط محیطی مناسب باشند، پراکنش دارند. محدوده پراکنش، وسعت و همچنین درصد پوشش آبسنگ‌های مرجانی با توجه به شرایط حاکم بر مناطق مختلف خلیج فارس متفاوت است. اکثر مرجان‌های مشاهده‌شده در اطراف جزایر ایرانی خلیج فارس از نوع حاشیه‌ای و کلونی‌های پراکنده (پچ) هستند. مرجان‌های Acroporidae، Poritidae و Merulinidae از نظر غالبیت و درصد پوشش مهم‌ترین سازندگان آبسنگ در خلیج فارس محسوب می‌شوند (بلوکی کورنده و همکاران، ۱۴۰۰). گونه‌های مرجان‌های Acroporidae، Poritidae در اعماق کمتر از ۵ متر یافت می‌شوند (قدمی یزدی و همکاران، ۱۳۹۲). پیش‌ازاین بیان می‌شد که آبسنگ‌های خلیج فارس از نوع حاشیه‌ای^۱ و در گروه آبسنگ‌های کم‌عمق هستند. اما در خلیج فارس، به علت نوسانات دمایی آب مرگ‌ومیر ناگهانی مرجان‌ها رخ می‌دهد و لذا آن‌ها قدرت تشکیل آبسنگ‌های حاشیه‌ای حقیقی را نداشته و می‌توان گفت نوع ساختار

استفاده از منابع ساحلی تايلند مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند. حداکثر دمای آب خلیج فارس ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سایر اقیانوس‌های گرمسیری است ازاین‌رو مطالعه مرجان‌های خلیج فارس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Riegl et al. 2011). این مطلب در نتایج تحقیق حیدری و همکاران (۱۴۰۰) که بر روی دمای خلیج فارس انجام دادند عنوان شد که دمای آب خلیج فارس در بعضی از نقاط ۱ تا ۲ درجه و گاهی ۲ تا ۳ درجه متفاوت‌تر از سایر نقاط محدوده‌ی مورد مطالعه است (Riegl et al. 2011). همچنین فاضل پور و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی ارتباط تغییرات دمایی در خلیج فارس با عمق آب عنوان کردند که هر چه عمق آب کمتر باشد میزان دمای آب بیشتر خواهد شد. همچنین دمای آب از عرض جغرافیایی و جریانات دریایی نیز تأثیر می‌گیرد. با توجه به این موارد خلیج فارس دمای آب بالایی را تجربه می‌کند که این امر آسیب و خطر جدی برای بوم‌سازگان مرجانی این منطقه محسوب می‌شود.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگر چه سنجش ازدور نقش مهمی در نقشه‌برداری و نظارت سفید شدن مرجان‌ها ایفا می‌کند، مقالات کمی در مورد پیش‌بینی و درک تغییرات آینده وجود دارد. تفاوت و نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با مقالات مشابه در محدوده‌ی خلیج فارس، بررسی روند ۳۵ ساله با تابع رگرسیونی هارمونیک و استفاده از آن برای پیش‌بینی و نمایش توزیع مکانی-زمانی تنش حرارتی منجر به سفید شدن مرجان‌ها در سال‌های آتی است. پژوهش حاضر می‌تواند مقدمه‌ای برای رفع خلأ مطالعاتی تحقیقات آینده در تعیین و پیش‌بینی کمیت تنش حرارتی منجر به سفید شدگی محدوده خلیج فارس و سایر عوامل قابل بررسی با رویکرد سنجش‌ازدور ماهواره‌ای باشد.

۲- مواد و روش‌ها

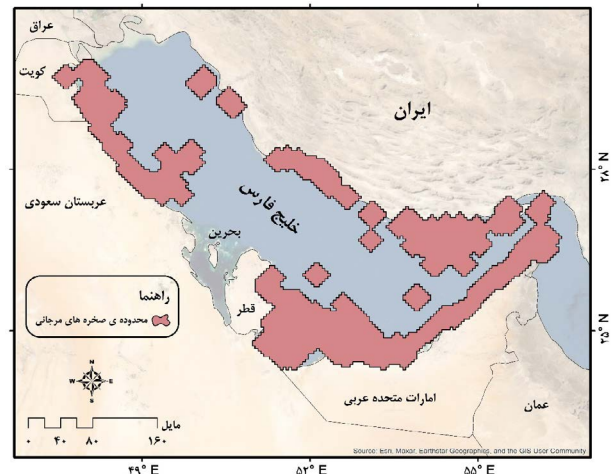
۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس آبراهی پراهمیت در آسیای غربی و منطقه‌ی خاورمیانه (۲۳۷،۴۷۳ کیلومتر مربع) است. این محدوده در

برای ذخیره و مدیریت داده‌های علمی چندبعدی^۸ استفاده می‌شود. همچنین شیپ فایل محدوده‌ی صخره‌های مرجانی^۹ داده‌ای جهانی است که توسط مؤسسه ESRI^{۱۰} تهیه شده است و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (Esri, 2022).

در مطالعه حاضر برای عملیات پردازش داده‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور شامل اجرای توابع و الگوریتم‌ها و پس پردازش شامل ارزیابی دقت نتایج و تهیه نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS Pro 2.8 استفاده شد که امکان پردازش داده‌های چندبعدی و مدل‌سازی دنیای واقعی و پیش‌بینی نتایج آینده با استفاده از داده‌های تاریخی با فرمت netCDF را فراهم می‌کند. این پژوهش به‌صورت کلی در سه مرحله انجام شد. نخست ورود، بررسی و آماده‌سازی داده‌ها که شامل ورود داده‌ی چندبعدی و تغییر سیستم تصویر و بصری سازی و ایجاد انیمیشن برای درک بهتر تغییرات داده‌های چندبعدی بود. دوم ایجاد پروفیل یا نیمرخ زمانی از میانگین داده‌ها در محدوده مورد مطالعه برای بازبینی داده‌های چندبعدی که نمای کلی از چگونگی تغییر دمای سطح دریا در طول زمان را ارائه می‌دهد؛ و در مرحله سوم با محاسبه‌ی روند و پیش‌بینی دمای سطح دریا مناطقی که احتمال سفید شدن مرجان‌ها در آن‌ها وجود داشت شناسایی شد. ابزار مورد استفاده در روش تحلیل، روند هر پیکسل را در طول یک بعد برای یک یا چند متغیر در یک رستر چندبعدی تخمین زد. سه گزینه خط روند برای برازش روند با مقادیر متغیر در طول یک بعد وجود دارد: خطی^{۱۱}، هارمونیک^{۱۲} و چندجمله‌ای^{۱۳} (Esri, 2022). در این تحلیل برای برازش خط روند از روش هارمونیک استفاده شد. استفاده از مدل رگرسیون هارمونیک در جوامع محیط زیستی به‌عنوان یک روش استاندارد برای بررسی الگوهای فصلی پذیرفته شده است (Ramanathan, K. et al. 2020).

آب‌سنگ‌ها به‌صورت فرشی^۱ است (قوام مصطفوی و همکاران، ۱۳۹۶). در نگاره ۱ موقعیت جغرافیایی خلیج فارس و محدوده‌ی صخره‌های مرجانی در غرب و شرق آن نشان داده شده است.



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲-۲- داده‌ها و روش کار

در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی سفید شدن مرجان‌ها از آرشیو داده‌های تحقیقاتی مرکز ملی تحقیقات جوی آمریکا (NCAR)^۲ استفاده شده است (Saha, S., et al. 2010; Sara, 2022). این مجموعه داده توسط پایگاه باز تحلیل‌شده‌ی اقلیمی NCEP CFSR^۳ با مشارکت سازمان نوآ (RDA^۴; ۲۰۲۲) ارائه شده است. این پایگاه داده فرایند پیش‌پردازش شامل تصحیحات رادیومتری، اتمسفری و هندسی را برای این داده‌ها به‌عمل آورده و آن‌ها را در فرمت nc یا netCDF^۵ ارائه کرده است. این داده‌ها شامل یک فایل (netCDF) با ۳۵ سال داده‌ی ماهانه دمای سطح دریا^۶ از ۱۹۸۰-۰۱-۰۱ تا ۲۰۱۵-۱۲-۰۱ (۱۳۵۸-۱۰-۱۱ تا ۱۳۹۴-۱۰-۰۹) با وضوح فضایی^۷ (۰/۵) درجه هستند. فرمت netCDF معمولاً

8- Multidimensional

9- Coral Reef Areas

10- Environmental Systems Research Institute

11- linear

12- harmonic

13- Polynomial

1- carpets coral

2- National Center for Atmospheric Research

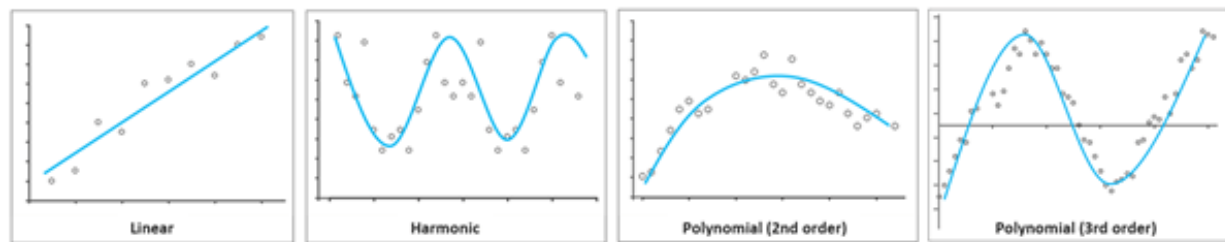
3- NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

4- The Research Data Archive

5- Network Common Data Form

6- Sea Surface Temperature

7- Spatial Resolution



نگاره ۲: انواع خط روند برای برازش روند (Esri, 2022)

به پیش‌بینی بر اساس فاصله‌ی زمانی موردنظر پرداخته شد. در این مطالعه، داده‌های پیش‌بینی برای یافتن مکان‌هایی که دمای آب برای مدت‌زمان طولانی گرم باقی می‌ماند، تجزیه و تحلیل شد. در این زمینه ابتدا، برای پارامترهای تجزیه و تحلیل آنومالی، میانگین دمای ماهانه در هر مکان با میانگین دمای کلی مقایسه شد تا ناهنجاری‌ها^۲ شناسایی شوند. برای این مرحله، از تابع Anomaly برای محاسبه ناهنجاری‌های مقدار پیکسل برای متغیرهای زمانی (میانگین ماهانه)^۳ در یک شیء رستری چندبعدی استفاده شد. سه روش ریاضی برای محاسبه مقادیر ناهنجاری با تابع Anomaly وجود دارد که در این پژوهش از روش تفاوت با میانگین^۴ استفاده شد.

Difference from mean = $x - \mu$ (Esri, 2022)

معادله ۲:

در معادله بالا X = مقدار پیکسل در یک برش یا مقطع زمانی است و μ = میانگین مقادیر آن پیکسل در یک بازه زمانی معین است. برخی مناطق ممکن است یک هفته دمای بالاتر از میانگین، اما در هفته بعد دمای کمتر از میانگین داشته باشند. از آنجایی که رویدادهای سفید شدن مرجان زمانی رخ می‌دهد که دمای سطح دریا برای دوره‌های زمانی طولانی بالا باشد، آمار (تعداد هفته‌های متوالی که دمای سطح دریا بالاتر از میانگین برای هر مکان افزایش می‌یابد) برای داده‌های دمای سطح دریا با استفاده از ابزارهای چندبعدی محاسبه شد تا مشخص شود مکان‌ها هرچند وقت یک‌بار دمای گرم را تجربه می‌کنند.

نگاره ۲ انواع خط روند برای برازش روند را نشان می‌دهد. خط روند هارمونیک یک خط منحنی است که به‌طور دوره‌ای تکرار می‌شود و بهترین استفاده را برای توصیف داده‌هایی دارد که از یک الگوی چرخه‌ای پیروی می‌کنند، مانند تغییرات دمای فصلی. پارامتر فرکانس مدل هارمونیک برای تناسب با داده‌ها استفاده می‌شود (Esri, 2022). در این مطالعه از پارامتر فرکانس ۲ در مدل هارمونیک استفاده شد که از ترکیب منحنی هارمونیک خطی مرتبه اول و منحنی هارمونیک مرتبه دوم برای برازش داده‌ها استفاده می‌کند. معادله خط روند هارمونیک به شرح زیر است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t + \sum_{i=1}^f \left(a_i \cos\left(\frac{2\pi}{365.25} \omega_i t\right) + Y_i \sin\left(\frac{2\pi}{365.25} \omega_i t\right) \right)$$

معادله (۱): خط روند هارمونیک (Esri, 2022)

در معادله ۱؛ y = مقدار متغیر پیکسل، t = تاریخ یا زمان بر اساس تقویم جولین، β_0 = محور y ، β_1 = نرخ تغییر، α ، γ = ضرایب تغییرات بین سالانه یا درون سالانه، f = فرکانس هارمونیک است (Esri, 2022).

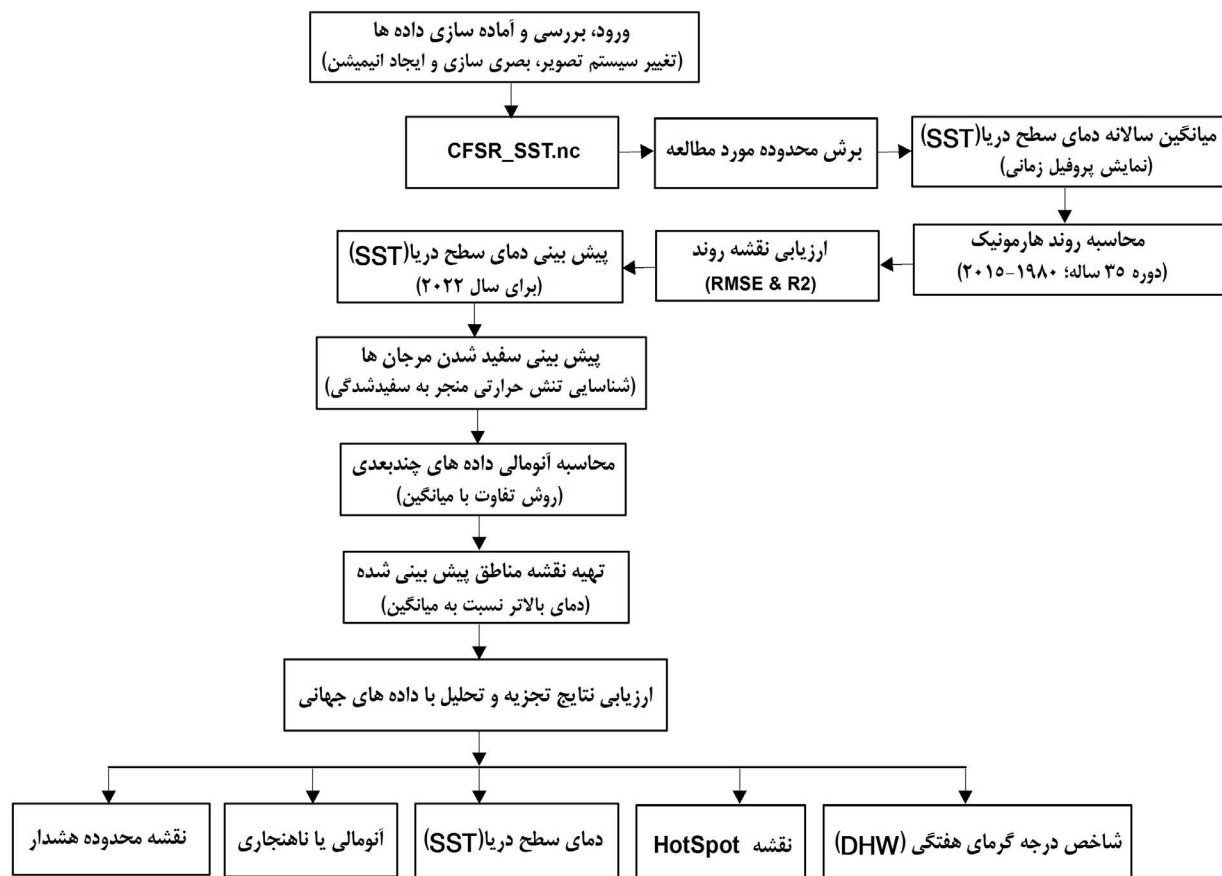
پارامترهایی که برای تهیه نقشه روند داده‌های چندبعدی انتخاب شد شامل متغیر دمای سطح آب (SST) و بعد زمان است. برای آزمون چگونگی و میزان دقت برازش روند داده‌ها توسط تابع رگرسیونی هارمونیک، ابزار پارامترهای آماری مختلفی را ارائه داد. برای ارزیابی نقشه‌ی روند از ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE)^۱ و ضریب تعیین (R-Squared) استفاده شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از نقشه‌ی روند تولیدشده

2- Anomaly

3- Recurring Monthly

4- Difference From Mean

1- Root Mean Square Error



نگاره ۳: مراحل کلی انجام پژوهش

دارد. نمودار ۲ تغییرات میانگین دمای سطح دریا (SST) و جدول ۱ مقدار میانگین سالانه آن را نشان می‌دهند. دوره‌ی زمانی ۳۵ ساله ۱۳۹۳-۱۳۵۹ (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵) است که از هر سال یک روز از یک ماه (۱۱ تیرماه معادل یک ژانویه) انتخاب شده است.

نمودار و جدول میانگین زمانی، نشان می‌دهد که دمای سطح دریا در محدوده خلیج فارس تغییر کرده است. این محدوده از سال ۱۳۷۵ (۱۹۹۶ میلادی) میانگین دمای بالاتری را تجربه کرده است که می‌تواند این منطقه را در معرض خطر سفید شدن مرجان‌ها قرار دهد. حداقل دمای میانگین در دوره‌ی زمانی مورد مطالعه ۲۹۹ درجه کلون در سال ۱۳۷۰ و حداکثر دمای میانگین در سال ۱۳۷۸ با مقدار ۳۰۱ درجه کلون است.

در مرحله‌ی نهایی مقدار ابعاد یا شاخص باند استخراج شد که در آن یک آمار معین برای هر پیکسل در یک رستر چندبعدی یا چند باندی به دست می‌آید و نقشه نهایی پیش‌بینی سفید شدن مرجان‌ها تهیه شد و سپس با استفاده از داده‌ها و نقشه‌های جهانی اداره‌ی ملی اقیانوسی و جوی نوآ^۱ (NOAA, CRW, 2022)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نگاره ۳ مراحل کلی انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

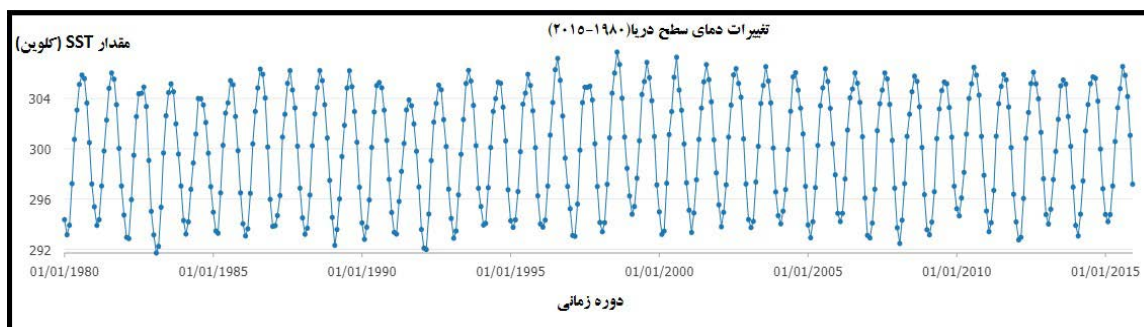
۳- نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل اولیه در نمودارهای ۱ و ۲ و جدول ۱ ارائه شده است. نمودار ۱ یک الگوی چرخه‌ای در دمای سطح دریا (درجه کلون) را نشان می‌دهد. این الگو با تغییرات فصلی دما در محدوده خلیج فارس مطابقت

1- National Oceanic and Atmospheric Administration

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سفر)

بررسی تأثیر دمای سطح دریا در پیش‌بینی وقایع سفید شدن مرجان‌های ... / ۱۰۷



نمودار ۱: تغییرات دمای سطح دریا (SST) در دوره‌ی زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۵ میلادی (۱۳۵۹-۱۳۹۳ شمسی)



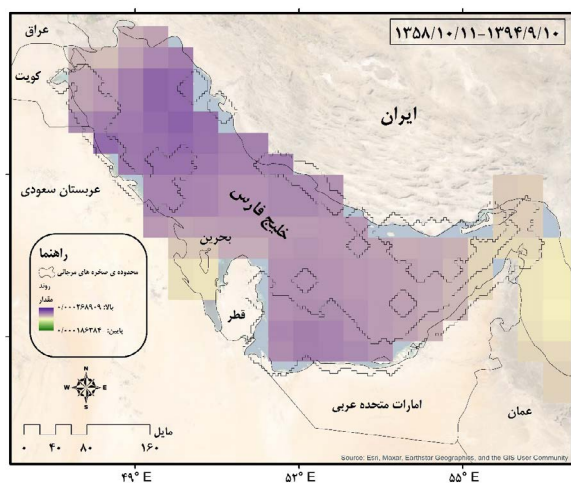
نمودار ۲: تغییرات میانگین دمای سطح دریا (SST) در دوره‌ی زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۵ میلادی (۱۳۵۹-۱۳۹۳ شمسی)

جدول ۱: مقدار میانگین سالانه دمای سطح دریا (SST) در دوره زمانی مورد مطالعه

شماره	تاریخ	دمای سطح دریا (SST)	شماره	تاریخ	دمای سطح دریا (SST)
۱	۱۳۵۹/۰۴/۱۱	۳۰۰/۰۳۲	۱۹	۱۳۷۷/۰۴/۱۱	۳۰۰/۶۶۰
۲	۱۳۶۰/۰۴/۱۱	۲۹۹/۹۸۰	۲۰	۱۳۷۸/۰۴/۱۱	۳۰۰/۷۳۷
۳	۱۳۶۱/۰۴/۱۱	۲۹۹/۱۴۱	۲۱	۱۳۷۹/۰۴/۱۲	۳۰۰/۱۱۳
۴	۱۳۶۲/۰۴/۱۱	۲۹۸/۹۶۰	۲۲	۱۳۸۰/۰۴/۱۱	۳۰۰/۴۱۰
۵	۱۳۶۳/۰۴/۱۱	۲۹۹/۰۵۹	۲۳	۱۳۸۱/۰۴/۱۱	۳۰۰/۴۴۷
۶	۱۳۶۴/۰۴/۱۱	۲۹۹/۵۳۲	۲۴	۱۳۸۲/۰۴/۱۱	۳۰۰/۰۶۰
۷	۱۳۶۵/۰۴/۱۱	۲۹۹/۸۱۸	۲۵	۱۳۸۳/۰۴/۱۲	۳۰۰/۱۰۸
۸	۱۳۶۶/۰۴/۱۱	۲۹۹/۸۹۷	۲۶	۱۳۸۴/۰۴/۱۱	۲۹۹/۹۸۲
۹	۱۳۶۷/۰۴/۱۱	۲۹۹/۹۲۴	۲۷	۱۳۸۵/۰۴/۱۱	۳۰۰/۳۱۸
۱۰	۱۳۶۸/۰۴/۱۱	۲۹۹/۵۱۰	۲۸	۱۳۸۶/۰۴/۱۱	۲۹۹/۹۳۷
۱۱	۱۳۶۹/۰۴/۱۱	۲۹۹/۶۷۴	۲۹	۱۳۸۷/۰۴/۱۲	۲۹۹/۷۴۴
۱۲	۱۳۷۰/۰۴/۱۱	۲۹۸/۷۵۸	۳۰	۱۳۸۸/۰۴/۱۱	۲۹۹/۸۱۵
۱۳	۱۳۷۱/۰۴/۱۱	۲۹۸/۸۵۷	۳۱	۱۳۸۹/۰۴/۱۱	۳۰۰/۸۲۶
۱۴	۱۳۷۲/۰۴/۱۱	۲۹۹/۷۰۲	۳۲	۱۳۹۰/۰۴/۱۱	۳۰۰/۰۰۹
۱۵	۱۳۷۳/۰۴/۱۱	۲۹۹/۸۸۰	۳۳	۱۳۹۱/۰۴/۱۲	۲۹۹/۹۱۷
۱۶	۱۳۷۴/۰۴/۱۱	۲۹۹/۷۵۴	۳۴	۱۳۹۲/۰۴/۱۱	۲۹۹/۹۱۶
۱۷	۱۳۷۵/۰۴/۱۱	۳۰۰/۱۴۳	۳۵	۱۳۹۳/۰۴/۱۱	۳۰۰/۱۰۱
۱۸	۱۳۷۶/۰۴/۱۱	۲۹۹/۷۱۶	۳۶	-	-

صخره‌های مرجانی و ایجاد شاخص آستانه گذاری استفاده شده است.

۳-۱- بررسی روند و پیش‌بینی دمای سطح دریا (SST)
دمای سطح دریا (SST) یک متغیر اساسی برای درک، نظارت و پیش‌بینی شار گرما، حرکت و گازها در مقیاس‌های مختلف است که تعامل پیچیده بین جو و اقیانوس را تعیین می‌کند (O'Carroll, A. et al. 2019). بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش (کمالی، ۱۳۹۴) نشان می‌دهد که تغییر دمای سطح آب SST خلیج فارس با افزایش دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ کاملاً هماهنگ است. همچنین در پژوهش (صنعتگران، ۱۳۸۸) افزایش میانگین دمای سطحی در خلیج فارس طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ تقریباً ۱ درجه سانتی‌گراد است که این فرایند می‌تواند با گرم شدن کره زمین همخوانی داشته باشد. نگاره ۴ روند هر پیکسل را در یک لایه رستری چندبعدی بر اساس متغیر دمای سطح آب (SST) نشان می‌دهد. این نقشه‌ی روند که دوره‌ی زمانی ۱۱-۱۰-۱۳۵۸ تا ۱۰-۹-۱۳۹۴ (۲۰۱۵-۱۹۸۰) را نشان می‌دهد، پایه‌ی پیش‌بینی دمای سطح آب در سال‌های آینده است.



نگاره ۴: نقشه روند دمای سطح دریا (SST) محدوده مورد مطالعه در دوره‌ی زمانی ۳۵ ساله

در رابطه با بررسی سری زمانی دمای سطح دریا (SST)، اژدري معموره و همکاران (۱۳۹۷) پژوهشی مشابه با استفاده از بررسی شاخص دما در پیش‌بینی سفید شدگی جوامع مرجانی نواحی جنوبی و شمالی خلیج فارس انجام دادند. بیشترین دما در دوره زمانی این پژوهش (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵) مربوط به سال (۱۳۷۷) ۱۹۹۸ است. همچنین بر اساس نمودار مقادیر درجه گرمای هفتگی (DHW^۱) این پژوهش بیشترین مقادیر برای سال‌های ۱۹۹۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۲، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ مشاهده شد که با وقوع پدیده‌های سفید شدگی در این سال‌ها مطابقت دارد. این پژوهش نتایج به دست آمده در تجزیه و تحلیل اولیه را مورد تأیید قرار داد. در مطالعه‌ای دیگر که توسط (جاوید و همکاران، ۱۳۹۹) انجام شده اثر گرمایش جهانی بر سفید شدگی اکوسیستم‌های مرجانی در برخی جزایر خلیج فارس بررسی شده است.

در این پژوهش با بررسی تغییرات دمایی سطح آب، نمودار نوسانات ماهانه سطح دریا (SST)، از دی‌ماه ۱۳۸۸ (ژانویه ۲۰۱۰) تا شهریورماه ۱۳۹۸ (سپتامبر ۲۰۱۹) حدود ۱۰ سال با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سازمان نوآ حاصل شد. این مطالعه نشان داد با وجود اینکه مرجان‌های خلیج فارس در مقایسه با مرجان‌های سایر مناطق در سراسر دنیا، مقاومت بسیار زیادی نسبت به درجه حرارت‌های بالا و تغییر اقلیم نشان داده‌اند، زمانی که دما از آستانه تحمل آن‌ها فراتر برود، این مرجان‌ها نیز سفید خواهند شد.

در پژوهش دیگری که توسط (Nanjkar, K. et al. 2022) انجام شده است تأثیر سفید شدن مرجانی مکرر در دوره‌ی (۲۰۱۹-۲۰۱۴) بر اکوسیستم مرجانی حاشیه‌ای دریای عرب شرقی با استفاده از پارامتر دمای سطح دریا ارزیابی شده است. این پژوهش که مبتنی بر سنجش‌ازدور است با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای AVHRR سازمان نوآ صورت گرفته است. در این مطالعه همچنین از سری زمانی (۲۰۱۹-۲۰۱۴) برای تجزیه و تحلیل تنش حرارتی در

جدول ۲: پارامترهای آماری ارزیابی دقت و نیکویی برازش نقشه روند

انحراف معیار	میانگین	حد اکثر	حد اقل	نام باندها
10/9861220736952	285/81393440414	302/388421448206	265/285667051825	Intercept
1/62392975807288	0/0193515153577676	3/23389931576309	-6/43864000885316	Harmonic_sin_1
1/72527824896602	-0/0866384865315637	6/02828161893984	-11/2587750596664	Harmonic_cos_1
0/370220991659652	0/177056517928543	3/27819522444758	-1/62120774741008	Harmonic_sin_2
0/257796296116368	0/0612286953688012	1/67207435603712	-1/72388113573994	Harmonic_cos_2
0/222111598228508	0/533215898295535	2/09048889491733	0/0363165948478757	RMSE
0/175781329630696	0/780201465222294	0/991528896981742	0/0595473201360407	R2

۲۰۱۲ استفاده کردند، نتایج نشان داد که روند در طول دوره مثبت بوده و فراوانی تنش حرارتی در سطح سفید شدن بین سال‌های ۹۱-۱۹۸۵ و ۱۲-۲۰۰۶ سه برابر افزایش یافته است. (Khosravi, Y, et al, 2020) نیز در پژوهشی با بررسی دمای سطح دریا (SST) و تغییرات فضایی آن در خلیج عمان برای دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ به این نتیجه رسیدند که گرم شدن SST در خلیج عمان در این بازه زمانی از نظر آماری معنی‌دار و مثبت بوده است. جدول ۲ پارامترهای آماری مختلف ارزیابی دقت و نیکویی برازش نقشه‌ی روند به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

در جدول ۲ میانگین ضریب تعیین $R^2 = 0/78$ است. این مقدار بیانگر این است که مقدار مشاهدات دمای سطح دریا (SST) را با مدل رگرسیونی هارمونیک ۷۸ درصد پیش‌بینی شده و مابقی تعریف نشده باقی ماند. این مقدار ضریب تعیین دقت نقشه روند را مورد تأیید قرار داد. یکی دیگر از پارامترهای آماری ریشه‌ی میانگین مربع خطا است که هر چه مقدار آن کمتر باشد نشان‌دهنده تناسب بهتر است. در جدول ۲ میانگین این خطا ۰/۵ است که نشان داد مدل رگرسیونی هارمونیک می‌تواند داده‌ها را با دقت پیش‌بینی کند.

در این پژوهش، پارامترهای نمودار روند هارمونیک و متغیر دمای سطح دریا (SST) در بازه زمانی هفتگی ۱ ژانویه ۲۰۱۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۲ (۱۱-۱۰-۱۳۸۹ تا ۱۰-

در نگاره ۴ مناطق بنفش گرم‌تر می‌شوند، درحالی‌که مناطق سبز سردتر می‌شوند. با توجه به نقشه به‌دست‌آمده بیشتر محدوده خلیج فارس باگذشت زمان گرم‌تر می‌شود. به‌خصوص مناطق شمال غربی خلیج فارس و تا حدودی جنوب آن بیشتر در معرض گرمای طولانی قرار دارند. میزان تغییرات دمایی خلیج فارس به‌خصوص در عرض‌های شمالی و مرکزی با عمق آب رابطه‌ای معکوس دارد (فاضل پور و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین دمای آب از شرق منطقه خلیج فارس به سمت غرب افزایش یافته و کمترین دما مربوط به نواحی شرقی خلیج فارس است (حیدری و همکاران، ۱۴۰۰). در پژوهش (جاوید و همکاران، ۱۳۹۹) بررسی نمودار تغییرات دمایی سطح آب در جزایر لارک، هندورابی، خارک و جزیره کیش نشان داد که تفاوت در تغییرات دمایی بین فصل زمستان و تابستان، طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸ (۲۰۱۹-۲۰۱۰) دیده می‌شود. اختلاف دمایی زیادتری بین فصل زمستان و تابستان جزیره خارک (حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد) در شمال شرقی خلیج فارس در مقایسه با دو جزیره لارک (۱۰/۱ درجه سانتی‌گراد) و هندورابی (۱۰/۸ درجه سانتی‌گراد) وجود دارد.

این پژوهش نتایج نقشه روند دمای سطح دریا (نگاره ۴) را برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ مورد تأیید قرار داد. (Heron, et al, 2016) در پژوهشی که انجام دادند از تحلیل روند داده‌های دمای سطح دریا (SST) در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۵ تا

پیش‌بینی شده سطح دریا (نگاره ۶) هنوز مناطق احتمالی رویداد سفید شدن مرجان‌ها را نشان نمی‌دهد. با این حال در مطالعه حاضر، این داده چندبعدی ورودی مرحله‌ی شناسایی ناهنجاری‌ها و مشخص کردن مناطقی که احتمالاً رویدادهای سفید شدن را تجربه می‌کنند، قرار گرفت.

(Liu, G. et al, 2018) در پژوهش خود برای پیش‌بینی دمای سطح دریا (SST) از شاخص درجه گرمای هفتگی (DHW) استفاده کردند. این پژوهش همچنین کاربرد الگوریتم مورد استفاده در نظارت بر تنش گرمایی سفیدکننده مرجانی ماهواره‌ای CRW^۱ سازمان نوآ، برای پیش‌بینی دمای سطح دریا (SST) را مورد تأیید قرار داد. پژوهش (Lachs, L., and et al, 2021) تنظیم دقیق الگوریتم‌های استرس گرمایی برای بهینه‌سازی پیش‌بینی‌های جهانی سفید شدن انبوه مرجان‌ها را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که با توجه به اثرات مخرب امواج گرمای دریایی در سراسر بوم‌سازگان، الگوریتم‌های تنش گرمایی مانند متریک درجه حرارت هفته (DHW) که برای نظارت بر خطر سفید شدن مرجان‌ها طراحی شده است را می‌توان برای سایر سیستم‌های بیولوژیکی تنظیم کرد.

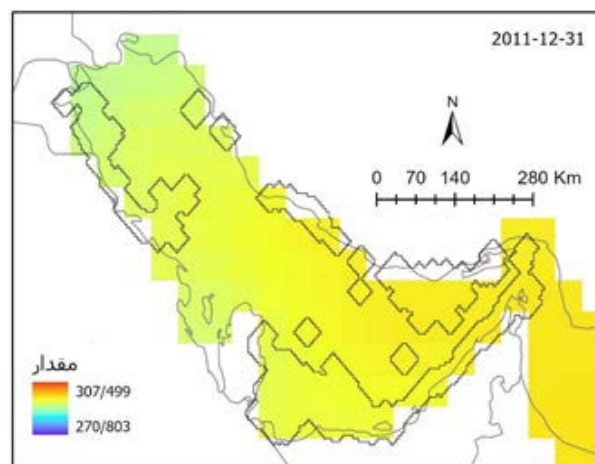
۳-۲- پیش‌بینی سفید شدن صخره‌های مرجانی^۲ در مناطق احتمالی

وقایع سفید شدن مرجان‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که صخره‌ها برای مدت طولانی در معرض دمای آب بالا قرار می‌گیرند (Sara, 2022). پژوهش (Liu, B. et al, 2021) رویداد شدید سفید شدن مرجان در شمال غربی جزیره هاینان، دریای چین جنوبی، در سال ۲۰۲۰ را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، از دمای سطح دریا (SST) CoralTemp و تصاویر Sentinel-2B برای تشخیص رویداد سفید شدن مرجان‌ها استفاده کردند. نتایج پژوهش این مطالعه نشان داد که سطح تنش حرارتی یک پارامتر مؤثر برای هشدار زودهنگام سفید شدن مرجان‌ها در مقیاس بزرگ است.

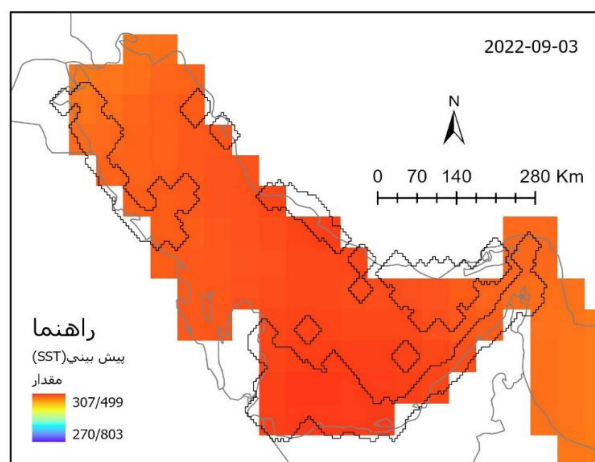
1- Coral Reef Watch

2- coral bleaching

۱۰-۱۴۰۱) مبنای تهیه یک لایه دمای سطح دریا (SST) پیش‌بینی شده به صورت چندبعدی قرار گرفت. نتایج آن در نگاره ۵ برای تاریخ ۱۰-۱۰-۱۳۹۰ و نگاره ۶ برای تاریخ ۱۲-۰۶-۱۴۰۱ نشان داده شده است.



نگاره ۵: دمای سطح دریا (SST) (۲۰۱۱-۱۲-۳۱)



نگاره ۶: دمای سطح دریا (SST) پیش‌بینی شده (۲۰۲۲-۰۹-۰۳)

نگاره ۵ نشان می‌دهد که محدوده خلیج فارس به خصوص مناطق شمال غربی آن در تاریخ موردنظر دمای پایینی دارد ولی نگاره ۶ نشان می‌دهد که بیشتر محدوده خلیج فارس دمای بالایی را تجربه می‌کند. با توجه به این که داده‌ی به دست آمده به صورت هفتگی است نقشه دمای

بالاتر از میانگین هستند. بیشتر منطقه خلیج فارس در برش زمانی^۱ نمایش داده شده زرد است اما در شمالی غربی و بخشی از جنوب مقدار آنومالی محدوده بیشتر است.

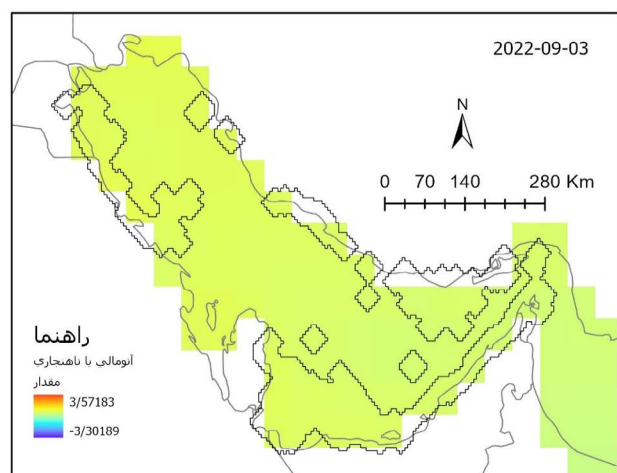
داده‌های ماهانه‌ی آنومالی کتابخانه داده‌های آب و هوایی IRI/LDEO دانشگاه کلمبیا با توجه به اقلیم‌شناسی دوره ۲۰۲۰-۱۹۹۱ ناهنجاری‌های ماهانه دمای سطح دریا در شمال غربی محدوده خلیج فارس را مورد تأیید قرار داد (IRI/LDEO Climate Data Library, 2022).

در پژوهش (Ferreira, B. P. et al, 2013) به بررسی تأثیر آنومالی دمای سطح دریا (SST) بر سفید شدن صخره‌های مرجانی در جنوب غربی اقیانوس اطلس پرداختند. نتایج نشان داد که کل منطقه تحت تأثیر ناهنجاری دمای بالا قرار گرفت که تا سال ۲۰۱۰ ادامه داشته است. همچنین یک رابطه مثبت معنی‌دار بین درصد سفید شدن مرجانی که بر روی سازندهای صخره‌ای مشاهده شد و ناهنجاری HotSpot SST مربوطه که توسط تصاویر ماهواره‌ها و شناورها به ثبت رسید، یافت شد. این نتایج نشان می‌دهد که گرمایش مشاهده‌شده در آب‌های اقیانوس با گرم شدن صخره‌ها همراه بود و درصد مرجان‌های سفید شده پس از فرونشست تنش حرارتی باقی می‌ماند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که تلاش‌های نظارت مستمر برای ارزیابی بیشتر رابطه بین شدت سفید شدن و ناهنجاری‌های دمای سطح دریا (SST) در پیش‌بینی‌های آینده سفید شدن مرجان‌های منطقه‌ای ضروری است.

افزایش تنها یک درجه سانتی‌گراد سبب بی‌رنگ شدن^۲ مرجان‌ها می‌شود و در اثر بی‌رنگ شدن، مرگ‌ومیر در آن‌ها اتفاق می‌افتد (محمدی روزبهانی و چوبکار، ۱۳۸۹). اگر مجموع هفته‌هایی که در آن ناهنجاری‌های دمایی وجود دارد؛ چهار هفته طول بکشد، سفید شدگی رخ نمی‌دهد و یا بسیار اندک است. اگر مجموع هفته‌های دارای ناهنجاری دمایی چهار تا هشت هفته طول بکشد؛ احتمال سفید شدگی مرجان‌ها قابل توجه است. بالاتر از هشت هفته وقوع ناهنجاری‌های

روند افزایشی میانگین سالانه دمای سطحی (SST) برای سواحل استان هرمزگان در شرق خلیج فارس برای دوره زمانی (۲۰۰۸-۱۹۸۵) در پژوهش (ترابی آزاد و محمدی، ۱۳۹۴) مورد تأیید قرار گرفته است.

(کریمیان و همکاران، ۱۳۹۵) نیز با بررسی ارزیابی تغییرات دمای سطح آب خلیج فارس برای دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ نشان دادند روند کلی دمای سطح آب در سال‌های مختلف تقریباً باهم همسو بوده و یکدیگر را تأیید می‌کنند و در حالت کلی روند افزایش دمای سطح آب خلیج فارس به چشم می‌خورد. ناهنجاری یا آنومالی انحراف یک مقدار مشاهده‌شده از مقدار متوسط آن است و در تجزیه و تحلیل مناطقی را نشان می‌دهد که دمای بالاتر از میانگین دارند. ناهنجاری‌های دمایی گرم سطح دریا همچنین می‌تواند به مدیران منابع طبیعی هشدار دهد که در آن دما، صخره‌های مرجانی ممکن است درخطر سفید شدن باشند (NASA Earth Observatory, 2022). نگاره ۷ نقشه آنومالی یا ناهنجاری پیش‌بینی شده را برای تاریخ ۰۳-۰۹-۲۰۲۲ (۱۲-۰۶-۱۴۰۱) نشان می‌دهد.



نگاره ۷: نقشه آنومالی یا ناهنجاری پیش‌بینی شده (۲۰۲۲-۰۹-۰۳)

در راهنمای نگاره ۷ مناطق آبی دارای دمای کمتر از میانگین هستند، درحالی‌که مناطق زرد و قرمز دارای دمای

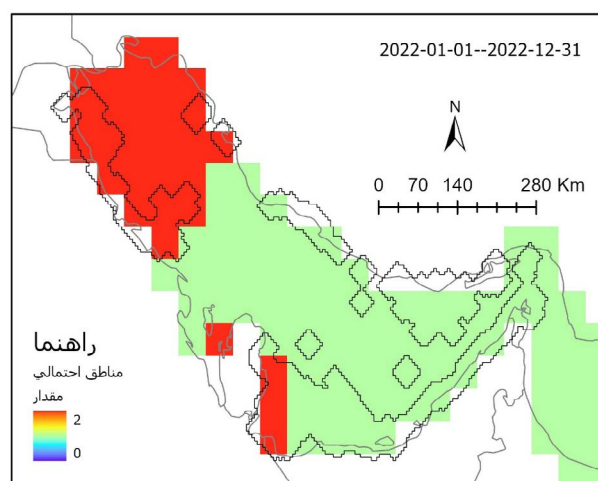
1- time slice

2- Bleaching

پژوهش (معموره خاطره و همکاران، ۱۳۹۷) مقاومت مرجان‌های جنوب خلیج فارس در برابر بی‌نظمی‌های دمای سطح دریا (SST) و خطر سفید شدگی مرجان‌های صخره‌ای در مقایسه با نواحی شمالی خلیج فارس را برای دوره ۱۹۹۸۰ تا ۲۰۱۵ مورد تأیید قرار داده است. پژوهش (Van, T. T., 2022) تأثیر روند افزایش دمای جهانی در پدیده ی سفید شدگی را برای منطقه ای ساحلی در غرب دریای شرقی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش برای بررسی رابطه احتمالی بین دمای سطح دریا و سفید شدن مرجان‌ها در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ از دو پارامتر لکه‌های داغ^۱ و درجه حرارت ماهانه^۲ استفاده کردند. نتایج وقایع سفید شدگی مرجان‌ها تحت تأثیر دما را تنها برای سال ۲۰۱۰ نشان داد. همچنین پژوهش (Spillman, C. M., 2010) نشان داد که مقادیر بالای درجه حرارت ماهانه (DHM) می‌تواند نشان‌دهنده افزایش خطر امواج گرمای دریایی باشد که احتمالاً در آینده تحت شرایط گرم شدن آب‌وهوا تأثیرات فزاینده‌ای بر صخره‌های مرجانی استرالیا خواهد داشت.

هفتگی مرگ‌ومیر گسترده مرجان‌ها را به همراه دارد (حلیان و همکاران، ۱۴۰۱).

نگاره ۸ نتایج شناسایی مناطقی را که برای مدت طولانی دمای بالاتری نسبت به میانگین دارند و در معرض سفید شدن قرار دارند برای بازه زمانی ۲۰۲۲-۰۱-۰۱ تا ۲۰۳۱-۱۲-۳۱-۲۰۲۲ نشان می‌دهد.



نگاره ۸: مناطقی پیش‌بینی شده (خطر سفید شدگی) (۲۰۲۲-۰۱-۰۱ تا ۲۰۳۱-۱۲-۳۱-۲۰۲۲).

۳-۳- بررسی جهانی سفید شدن مرجان‌ها

داده‌های NOAA (CRW^۳) به صورت روزانه (هفتگی) و در مقیاس جهانی با قدرت تفکیک ۵ کیلومتری، دمای سطح دریا (SST)، نقشه روند که روزانه به روز می‌شود، اطلاعاتی در مورد سرعت و جهت تغییرات SST، آنومالی و بنابراین تنش گرمایی سفیدکننده مرجانی، در صورت وجود، در هفت روز گذشته ارائه می‌دهد (NOAA, CRW, 2022). در پژوهشی که توسط (Skirving, et al, 2020) انجام گرفت مجموعه محصولات استرس گرمایی نسخه ۱،۳ برای وضعیت سفید شدن مرجان‌ها مبتنی بر دمای سطح دریا (SST) از جمله نوع داده‌ها، روش‌ها و... مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی دقت نتایج به دست آمده از

در راهنمای نگاره ۸ نواحی به رنگ آبی جاهایی هستند که دما فقط برای چند هفته در هر بار بالاتر از حد متوسط است، در حالی که مناطقی زرد و قرمز جاهایی هستند که دما برای مدت طولانی‌تر از میانگین بالاتر است و در خطر سفید شدگی قرار دارند. در برش زمانی سالانه پیش‌بینی شده (۲۰۲۲)، شمال غربی و قسمتی از جنوب منطقه خلیج فارس با مدت زمان شدید دمای بالا مواجه می‌شوند. معمولاً پیش‌بینی می‌شود که شروع سفید شدن مرجان‌ها زمانی اتفاق بیفتد که SST از حداکثر اقلیمی محلی ۱ درجه سانتی‌گراد برای یک ماه یا بیشتر فراتر رود (Donner, S. D. 2011). دمای این مناطق ۲ درجه بالاتر از میانگین قرار دارد و مناطق دیگر برای مدت‌های کوتاه‌تر، اما همچنان نگران‌کننده، در خطر سفید شدگی مرجان‌ها هستند.

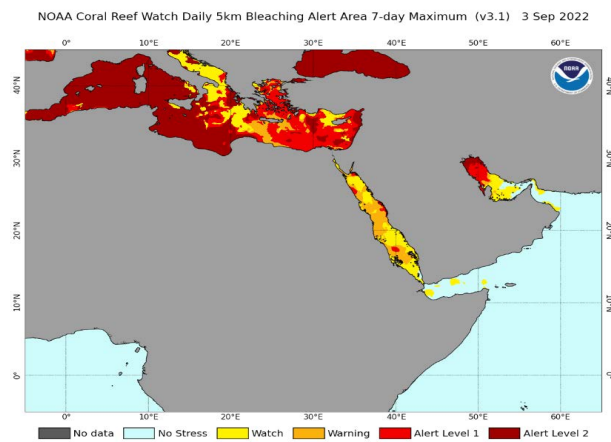
1- Hot Spot

2- Degree Heating Months

3- Coral Reef Watch

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)

بررسی تأثیر دمای سطح دریا در پیش‌بینی وقایع سفید شدن مرجان‌های ... / ۱۱۳



نگاره ۱۱: نقشه محدوده هشدار به تاریخ ۲۰۲۲-۰۹-۰۳

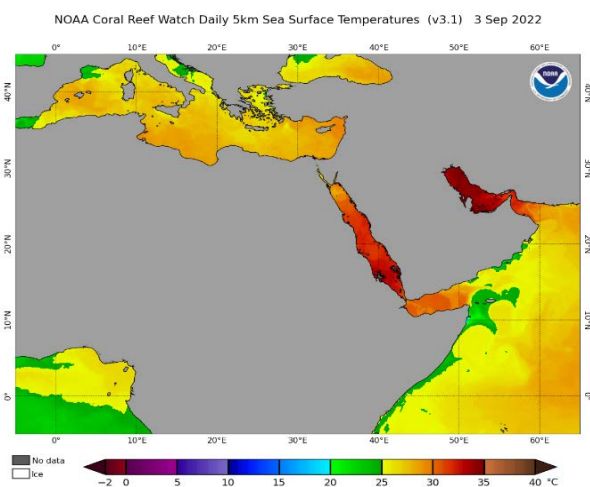
(NOAA, CRW, 2022)

مقایسه‌ی نقشه‌های به‌دست‌آمده (نگاره‌های ۶، ۷ و ۸) در این مطالعه که مربوط به پیش‌بینی روند داده‌های ۳۵ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵) از سال ۲۰۲۲ هستند با نقشه‌های سال ۲۰۲۲ داده‌های نوآ (نگاره‌های ۹، ۱۰ و ۱۱)، نشان می‌دهد که تجزیه و تحلیل‌ها و روش مورد استفاده نتایج قابل قبولی را ارائه داده‌اند.

نگاره ۸ و ۱۱ هر دو بیان‌گر این مورد است که محدوده‌ی شمال غربی و بخشی از قسمت‌های جنوبی از نظر محیط زیستی در معرض خطر سفیدشدگی مرجان‌ها قرار دارند. الگوریتم ماهواره‌ای CRW، میزان تنش گرمایی روزانه را که می‌تواند منجر به سفید شدن مرجان‌ها شود، اندازه‌گیری می‌کند. از آنجایی که هم شدت و هم مدت تنش گرمایی در وقوع و شدت سفید شدن، به‌ویژه سفید شدن انبوه مرجان‌ها نقش دارد، DHW روزانه ماهواره‌ای CRW (بیان‌شده در واحد $^{\circ}\text{C-weeks}$) تمام مقادیر HotSpot روزانه را که حداقل ۱ درجه سانتی‌گراد هستند در طول یک دوره ۱۲ هفته‌ای (۸۴ روزه) تجمیع می‌کند (Glynn and D'Croz, 1990; Liu et al.

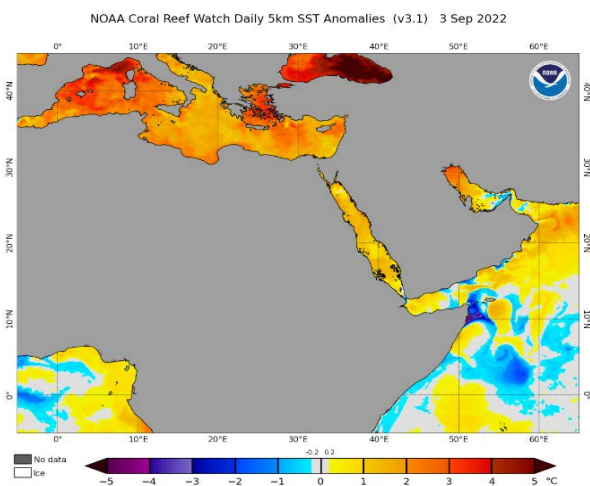
2003, 2013, 2014; Eakin et al. 2010; Heron et al. 2016a; Liu, G. and et al, 2018). بنابراین DHW مطابق نگاره ۱۲ وقوع و شدت بالقوه وقایع سفیدکننده را برای محدوده‌ی شمال غربی خلیج فارس نشان داد. همچنین بر اساس این یافته که دمای

تجزیه و تحلیل و روش مورد استفاده در پیش‌بینی دمای سطح دریا و شناسایی ناهنجاری‌ها (۲۰۲۲-۰۹-۰۳) آن‌ها با نقشه‌های NOAA(CRW) در همان تاریخ مقایسه شدند. نگاره‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ به ترتیب دمای سطح دریا (SST)، آنومالی یا ناهنجاری و محدوده هشدار داده‌های نوآ را برای تاریخ ۲۰۲۲-۰۹-۰۳ نشان می‌دهند.



نگاره ۹: دمای سطح دریا (SST) به تاریخ ۲۰۲۲-۰۹-۰۳

(NOAA, CRW, 2022)



نگاره ۱۰: نقشه آنومالی یا ناهنجاری به تاریخ ۲۰۲۲-۰۹-۰۳

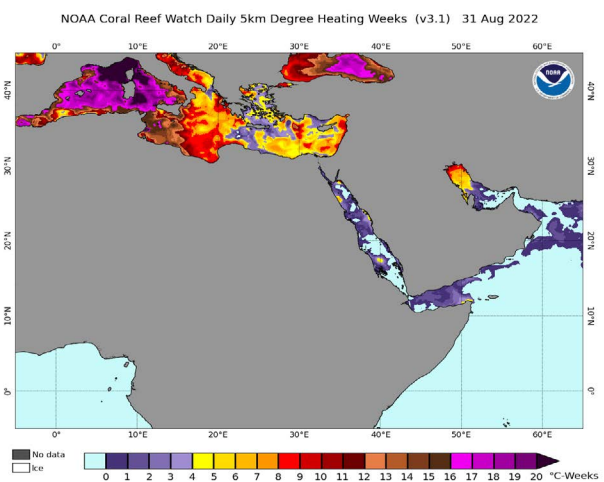
(NOAA, CRW, 2022)

۴- نتیجه گیری

در تشخیص ماهواره‌ای سفید شدن مرجان‌ها معمولاً از پارامترهای محیطی غیرمستقیم یا تشخیص مستقیم تصاویر استفاده می‌شود. دمای سطح دریا (SST) پارامتر محیطی کلیدی است. در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای SST برای پیش‌بینی سفید شدن مرجان‌ها استفاده شد. نتایج اولیه نشان داد که دمای سطح دریا (SST) در محدوده خلیج فارس تغییر کرده است. بیشتر محدوده خلیج فارس با گذشت زمان گرم‌تر می‌شود. به خصوص مناطق شمال غربی خلیج فارس و تا حدودی جنوب آن بیشتر در معرض گرمای طولانی قرار دارند. لایه دمای سطح دریای (SST) هفتگی پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۲۲ نشان داد که بیشتر محدوده خلیج فارس دمای بالایی را تجربه می‌کند. نتایج شناسایی آنومالی، مقدار بیشتر ناهنجاری را در شمال غربی محدوده خلیج فارس نشان داد. مناطق پیش‌بینی شده در خطر سفید شدن مرجان‌ها (۲۰۲۲)، با ۲ درجه بالاتر از میانگین، در شمال غربی و قسمتی از جنوب منطقه خلیج فارس شناسایی شد. داده‌های نوآ نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه را مورد تأیید قرار داد. این پژوهش امکان استفاده از پیش‌بینی و درک فضایی-زمانی پارامترهای تنش حرارتی برای هشدار سفید شدن مرجان‌ها را تأیید کرد.

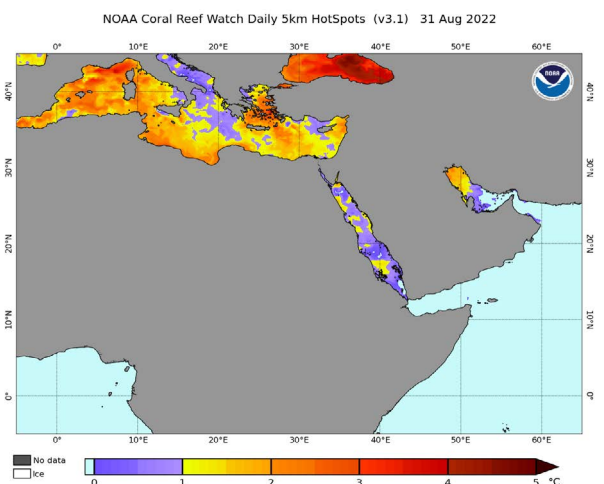
نتایج این پژوهش مبتنی بر پارامتر مؤثر دمای سطح دریا (SST) است. حال آنکه عوامل مؤثر دیگری مانند تغییرات نوری، مواد مغذی و... نیز در سفید شدن مرجان‌ها نقش دارند و بررسی و پیش‌بینی همه‌ی این پارامترها به‌صورت هم‌زمان جزء محدودیت‌هایی است که این پژوهش قادر به رفع آن نبود. پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که پیش‌بینی رویدادهای سفید شدن مرجان‌ها را می‌توان با در نظر گرفتن سایر عوامل مانند سطوح نور بهبود بخشید. با این حال، آنچه در حال حاضر کمتر قطعی است این است که چگونه می‌توان نتیجه چنین رویدادهایی یعنی میزان بهبود یا مرگ مرجان‌ها را پیش‌بینی کرد. این یک مشکل مدیریتی جدی‌تری است و حل آن نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. پیشنهاد می‌شود از

بیش از ۱ درجه سانتی‌گراد بالاتر از حداکثر معمول تابستان برای ایجاد سفیدی در مرجان‌ها کافی است (Glynn and D'Croz, 1990; Liu, G. and et al, 2018) با نگراره ۱۳ در محدوده‌ی شمال غربی خلیج فارس تأیید شد (دمای $MMM + 1$ درجه سانتی‌گراد یعنی $HotSpot = 1$ درجه سانتی‌گراد).



نگاره ۱۲: شاخص درجه گرمای هفتگی (DHW)

(NOAA, CRW, 2022)



نگاره ۱۳: نقشه HotSpot (NOAA, CRW, 2022)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

بررسی تأثیر دمای سطح دریا در پیش‌بینی وقایع سفید شدن مرجان‌های ... / ۱۱۵

بررسی تأثیر تغییرات دمای سطح دریا (SST) بر اکوسیستم‌های مرجانی مطالعه موردی: جزیره کیش. نشریه علمی پژوهشی اقیانوس‌شناسی، ۱۳(۵۰)، ۷۲-۵۹.

۷- حیدری، نظری‌سامانی، فیض‌نیا، فرزین. (۱۴۰۰)، برآورد دمای سطح آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور در خلیج فارس، هفتمین کنفرانس بین‌المللی کشاورزی، محیط‌زیست، توسعه شهری و روستایی، <https://civilica.com/doc/1256640>.

۸- صنعتگران. (۱۳۸۸). بررسی روند تغییرات دمای سطحی در خلیج فارس، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران. ۹- فاضل‌پور، داد الهی، علمی‌زاده، عسگری، خزاعی. (۲۰۱۶). ارزیابی برآورد دمای سطح آب و ارتباط سنجی پارامتر دما با عمق در خلیج فارس با استفاده از سنجنده مودیس. مجله علوم و فنون دریایی، ۱۵(۲)، ۱۳۰-۱۴۲.

۱۰- قدمی یزدی، مصطفوی، قوام، فاطمی. (۱۳۹۲). بررسی تنوع مرجان‌های سخت آب‌های اطراف جزیره هندورابی - خلیج فارس. همایش: علوم جانوران آبی، دوره برگزاری: ۱.

۱۱- قوام مصطفوی، دوست سلیمی، اشرفی. (۱۳۹۶). برنامه مدیریت جامع آبسنگ‌های مرجانی جزایر تنب، ابوموسی و سیری از طریق شناسایی گونه‌ای، بررسی وضعیت سلامت و تهیه نقشه پراکنش آن‌ها؛ سازمان حفاظت محیط‌زیست، حوزه معاونت محیط‌زیست دریایی، بخش مرجان‌های خلیج فارس، ص ۶.

۱۲- کمالی، صمد، ۱۳۹۴، تحلیل تغییرات دمای سطح آب خلیج فارس نسبت به میانگین بلندمدت در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰، اولین همایش علمی پژوهشی افق‌های نوین در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی ایران، تهران، <https://civilica.com/doc/395391>.

۱۳- محمدی روزبهرانی، چوبکار. (۲۰۱۰). بررسی عوامل تهدیدکننده اکوسیستم‌های مرجانی و راهکارهای حفاظتی. انسان و محیط‌زیست، ۸ (شماره ۴ (۱۵-پیاپی ۲۶)، ۸۹-۹۴.

محصولات دمای سطح دریا (SST) و عوامل مؤثر دیگر مانند سطوح نوری مبتنی بر مشاهدات سنجش‌ازدور ماهواره‌ای در تشخیص، پیش‌بینی، هشدار اولیه و نظارت بر توسعه سفید شدن مرجان‌ها به‌عنوان پشتیبان تحقیقات میدانی و حفاظت از اکوسیستم صخره‌های مرجانی خلیج فارس استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد تا سازمان‌های مربوطه (مانند پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوّی) و پژوهشگران، داده‌های سازمان نوآ را به‌عنوان مکمل و منبعی معتبر در گزارش‌ها و پژوهش‌های آتی سفید شدن مرجان‌های خلیج فارس مورد استفاده قرار دهند.

۵- منابع و مآخذ

۱- اژدری‌معموره، گندمکار، کبیری. (۲۰۱۸). استفاده از شاخص دما در پیش‌بینی سفید شدگی جوامع مرجانی نواحی جنوبی و شمالی خلیج فارس. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۹(۵)، ۴۱-۵۲.

۲- بلوکی کورنده، ندرلو، خروشی، زنگی‌آبادی. (۲۰۲۱). تنوع گونه‌ای مرجان‌های سخت در آب‌های ایرانی خلیج فارس و دریای عمان. علوم و فنون شیلات، ۱۰(۲)، ۱۷۳-۱۸۸.

۳- پارساپور. ۱۴۰۱، مرکز مطالعات خلیج فارس؛ مؤسسه مطالعات ژئوپلیتیک، استراتژیک، تاریخ و جغرافیای خلیج فارس، <http://www.persiangulfstudies.com/fa/pages/166>.

۴- ترابی آزاد، محمدی. (۲۰۱۵). مطالعه دمای سطحی آب دریا (SST) و سرعت باد در سواحل استان هرمزگان بر اساس داده‌های ماهواره‌ای. پژوهش‌های علوم و فنون دریایی، ۱۰(۳)، ۸۱-۹۱.

۵- جاوید، بهزادی، رنجبر، شریف. (۲۰۲۱). اثر گرمایش جهانی بر سفید شدگی اکوسیستم‌های مرجانی در برخی جزایر خلیج فارس. فصلنامه محیط‌زیست جانوری، ۱۳(۲)، ۳۸۷-۳۹۴.

۶- حلیان، کبیری، صفرنژاد، شیرانی، مصیب. (۲۰۲۲).

- 25- França, F. M. Benkwitt, C. E. Peralta, G. Robinson, J. P. Graham, N. A. Tylianakis, J. M. ... & Barlow, J. (2020). Climatic and local stressor interactions threaten tropical forests and coral reefs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190116.
- 26- Ferrier-Pages, C. Sauzeat, L. Balter, V. 2018. Coral bleaching is linked to the capacity of the animal host to supply essential metals to the symbionts. *Glob. Chang. Biol.* 24, 3145–3157. <https://doi.org/10.1111/gcb.14141>.
- 27- Ferreira, B. P. Costa, M. B. S. F. Coxey, M. S. Gaspar, A. L. B. Veleda, D. & Araujo, M. (2013). The effects of sea surface temperature anomalies on oceanic coral reef systems in the southwestern tropical Atlantic. *Coral reefs*, 32(2), 441–454.
- 28- Fulton, C.J. Berkström, C. Wilson, S.K. Abesamis, R.A. Bradley, M. Åkerlund, C. Barrett, L.T. Bucol, A.A. Chacin, D.H. Chong, S.K.M. et al. Macroalgal meadow habitats support fish and fisheries in diverse tropical seascapes. *Fish Fish.* 2020, 21,700–717.
- 29- Gardner, S.G. Camp, E.F. Smith, D.J. Kahlke, T. Osman, E.O. Gendron, G. Hume, B.C. C. Pogoreutz, C. Voolstra, C.R. Suggett, D.J. 2019. Coral microbiome diversity reflects mass coral bleaching susceptibility during the 2016 El Nino heat wave. *Ecol. Evol.* 9, 938–956. <https://doi.org/10.1002/ece3.4662>.
- 30- Gibson, R. Atkinson, R. Gordon, J. Smith, I. Hughes, D. Coral-associated invertebrates: Diversity, ecological importance and vulnerability to disturbance. In *Oceanography and Marine Biology*; Taylor & Francis: Oxford, UK, 2011; Volume 49, pp. 43–104.
- 31- Gilmour, J.P. Smith, L.D. Heyward, A.J. Baird, A.H. Pratchett, M.S. 2013. Recovery of an isolated coral reef system following severe disturbance. *Science* 340 (6128), 69–71.
- 32- Glynn, P.W. 2011. In tandem reef coral and cryptic metazoan declines and extinctions. *Bull. Mar. Sci.* 87, 767–794.
- 33- Graham, N. A. Robinson, J. P. Smith, S. E. Govinden, R. Gendron, G. & Wilson, S. K. (2020). Changing role of coral reef marine reserves in a warming climate. *Nature Communications*, 11(1), 1–8.
- 34- Harborne, A. R., Rogers, A., Bozec, Y. M., & Mumby, 14- Allemand, D. Osborn, D. 2019. Ocean acidification impacts on coral reefs: From sciences to solutions. *Reg. Stud. Marine Sci.* 28, 100558 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100558>.
- 15- Bruno, J. F. Bates, A. E. Cacciapaglia, C. Pike, E. P. Amstrup, S. C. Van Hooidek, R. ... & Aronson, R. B. (2018). Climate change threatens the world's marine protected areas. *Nature Climate Change*, 8(6), 499–503.
- 16- Baird, M.E. Green, R. Lowe, R. Mongin, M. Bougeot, E. Optimising cool-water injections to reduce thermal stress on coral reefs of the Great Barrier Reef. *PLoS ONE* 2020, 15, e0239978. [CrossRef] [PubMed].
- 17- Baker, A.C. Glynn, P.W. Riegl, B. 2008. Climate change and coral reef bleaching: an ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 80, 435–471.
- 18- Burt, J. Bartholomew, A. Usseglio, P. 2008. Recovery of corals a decade after a bleaching event in Dubai, United Arab Emirates. *Mar. Biol.* 154 (1), 27–36.
- 19- Donner, S. D. (2011). An evaluation of the effect of recent temperature variability on the prediction of coral bleaching events. *Ecological Applications*, 21(5), 1718–1730.
- 20- Downs, C.A. McDougall, K.E. Woodley, C.M. Fauth, J.E. Richmond, R.H. Kushmaro, A. Gibb, S.W. Loya, Y. Ostrander, G.K. Kramarsky-Winter, E. 2013. Heat-stress and light-stress induce different cellular pathologies in the symbiotic dinoflagellate during coral bleaching. *PLoS One* 8, e77173. doi: 10.1371/journal.pone.0077173.
- 21- Epstein, H.E. Smith, H.A. Torda, G. Oppen, M.J.H. 2019. Microbiome engineering: Enhancing climate resilience in corals. *Front. Ecol. Environ.* 17, 100–108. <https://doi.org/10.1002/fee.2001>.
- 22- Esri, 2022, <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=7d6830191f414d4f9663b1f5d8acaef4>
- 23- Esri, 2022, Generate Trend Raster (Image Analyst), <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.9/tool-reference/image-analyst/generate-trend-raster.htm>.
- 24- Esri, 2022, Generate Multidimensional Anomaly (Image Analyst), <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/image-analyst/generate-multidimensional-anomaly.htm>.

Sensing, 13(14), 2677.

44- Lamb, J. B. Wenger, A. S. Devlin, M. J. Ceccarelli, D. M. Williamson, D. H. & Willis, B. L. (2016). Reserves as tools for alleviating impacts of marine disease. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1689), 20150210.

45- Levin, R.A. Beltran, V.H. Hill, R. Kjelleberg, S. McDougald, D. Steinberg, P.D. van Oppen, M.J. 2016. Sex, scavengers, and chaperones: Transcriptome secrets of divergent *Symbiodinium* thermal tolerances. *Mol. Biol. Evol.* 33, 2201–2215. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw119>.

46- Liu, G. Eakin, C. M. Chen, M. Kumar, A. De La Cour, J. L. Heron, S. F. ... & Strong, A. E. (2018). Predicting heat stress to inform reef management: NOAA coral reef watch's 4-month coral bleaching outlook. *Frontiers in Marine Science*, 5, 57.

47- Liu, G. Skirving, W. J. Geiger, E. F. De La Cour, J. L. Marsh, B. L. Heron, S. F. ... & Eakin, C. M. (2017). NOAA Coral Reef Watch's 5km satellite coral bleaching heat stress monitoring product suite version 3 and four-month outlook version 4. *Reef Encounter*, 32(1), 39-45.

48- Liu, B. Guan, L. & Chen, H. (2021). Detecting 2020 Coral Bleaching Event in the Northwest Hainan Island Using CoralTemp SST and Sentinel-2B MSI Imagery. *Remote Sensing*, 13(23), 4948.

49- Loya, Y. Sakai, K. Yamazato, K. Nakano, Y. Sambali, H. van Woesik, R. 2001. Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecol. Lett.* 4, 122–131.

50- MacNeil, M. A. Mellin, C. Matthews, S. Wolff, N. H. McClanahan, T. R. Devlin, M. ... & Graham, N. A. (2019). Water quality mediates resilience on the Great Barrier Reef. *Nature Ecology & Evolution*, 3(4), 620-627.

51- Moberg, F. Folke, C. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecol. Econ.* 29, 215–233.

52- Nanajkar, De, K., Arora, M., M., Nithyanandan, M., Mote, S., & Ingole, B. (2022). Application of remotely sensed sea surface temperature for assessment of recurrent coral bleaching (2014–2019) impact on a marginal coral ecosystem. *Geocarto international*, 37(15), 4483-4508.

53- NASA Earth Observatory, (2022). Sea Surface Temperature Anomaly. <https://earthobservatory.nasa>.

P. J. (2017). Multiple stressors and the functioning of coral reefs. *Annual Review of Marine Science*, 9, 445-468.

35- Heron, S. F. Maynard, J. A. Van Hooidonk, R. & Eakin, C. M. (2016). Warming trends and bleaching stress of the world's coral reefs 1985–2012. *Scientific reports*, 6(1), 1-14.

36- Hoegh-Guldberg, O. Pendleton, L. Anne Kaup, A. 2019. People and the changing nature of coral reefs. *Reg. Stud. Marine Sci.* 30, 100699. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100699>.

37- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., ... & Wilson, S. K. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373-377.

38- Hughes, T.P. Kerry, T. Simpson, T. 2018. Large-scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef. *Ecology* 99, 501.

39- IRI/LDEO Climate Data Library, (2022). Monthly Sea Surface Temperature Anomaly. https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Ocean_Temp/Anomaly.html.

40- Khosravi, Y. Bahri, A. & Tavakoli, A. (2020). Investigation of Sea Surface Temperature (SST) and its spatial changes in Gulf of Oman for the period of 2003 to 2015. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(4), 165-179.

41- Kuo, C.Y. Lough, J.M. Lowe, R.J. Liu, G. McCulloch, M.T. Malcolm, H.A. McWilliam, M.J. Pandolfi, J.M. Pears, R.J. Pratchett, M.S. Schoepf, V. Simpson, T. Skirving, W.J. Sommer, B. Torda, G. Wachenfeld, D.R. Willis, B.L. Wilson, S.K. 2017. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543, 373–377. <https://doi.org/10.1038/nature21707>.

42- Kwiatkowski, L. Cox, P. Halloran, P.R. Mumby, P.J. Wiltshire, A.J. Coral bleaching under unconventional scenarios of climate warming and ocean acidification. *Nat. Clim. Chang.* 2015, 5, 777–781. [CrossRef].

43- Lachs, L., Bythell, J. C., East, H. K., Edwards, A. J., Mumby, P. J., Skirving, W. J., ... & Guest, J. R. (2021). Fine-tuning heat stress algorithms to optimise global predictions of mass coral bleaching. *Remote*

- 63- Riegl, B.M. S.J. Purkis, A.S. Al-Cibahy, M.A. Abdel-Moati, and O. Hoegh-Guldberg. 2011. Present limits to heat-adaptability in corals and population-level responses to climate extremes. *PLoS One* 6: e24802.
- 64- Saha, S. et al. 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Monthly Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6DN438J>.
- 65- ShepSara, B. (2020). Predict coral bleaching events <https://learn.arcgis.com/en/projects/predict-coral-bleaching-events/arcgis-pro/>.
- 66- Skirving, W. Marsh, B. De La Cour, J. Liu, G. Harris, A. Maturi, E. ... & Eakin, C. M. (2020). Coraltemp and the coral reef watch coral bleaching heat stress product suite version 3.1. *Remote Sensing*, 12(23), 3856.
- 67- Smith, T.B. Nemeth, R.S. Blondeau, J. Calnan, J.M. Kadison, E. Herzlieb, S. 2008. Assessing coral reef health across onshore to offshore stress gradients. *Mar. Pollut. Bull.* 56, 1983–1991.
- 68- Spillman, C. M., & Smith, G. A. (2021). A new operational seasonal thermal stress prediction tool for coral reefs around Australia. *Frontiers in Marine Science*, 8, 687833.
- 69- The Research Data Archive(RDA), 2020. dataset description page. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.2/#!description>.
- 70- Vajed Samiei, J. Saleh, A. Mehdinia, A. Shirvani, A. & Sharifi, H. (2014). Specific thermal regime and coral bleaching pattern in Hengam Island, the eastern Persian Gulf. 15-26, (17)5, نشریه علمی پژوهشی خلیج فارس.
- 71- van Beukering, P. Brander, L. Zanten, B.V. Verbrugge, E. Lems, K. 2011. The economic value of the coral reef ecosystems of the United States Virgin Islands. Report R-11/ 06. IVM Institute for Environmental Studies, Amsterdam.
- 72- Van, T. T., Hieu, N. T. D., Huan, N. H., & Lien, N. P. (2022). Investigating Sea Surface Temperature and Coral Bleaching in the Coastal Area of Khanh Hoa Province. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 964, No. 1, p. 012004). IOP Publishing. [gov/global-maps/AMSRE_SSTAn_M](https://global-maps/AMSRE_SSTAn_M).
- 54- Nguyen, T. Lique, B. Mengersen, K. & Sous, D. (2021). Mapping of Coral Reefs with Multispectral Satellites: A Review of Recent Papers. *Remote Sensing*, 13(21), 4470.
- 55- NOAA Coral Reef Watch. 2022, updated daily. NOAA Coral Reef Watch Version 3.1 Daily 5km Satellite Regional Virtual Station Time Series Data for Southeast Florida, Mar. 12, 2013-Mar. 11, 2014. College Park, Maryland, USA: NOAA Coral Reef Watch. Data set accessed 2020-02-05 at <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php>.
- 56- O'Carroll, A. G. Armstrong, E. M. Beggs, H. M. Bouali, M. Casey, K. S. Corlett, G. K. ... & Wimmer, W. (2019). Observational needs of sea surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, 6, 420.
- 57- Orlando, J.L. Yee, S.H. 2016. Linking Terrigenous Sediment Delivery to Declines in Coral Reef Ecosystem Services. *Estuaries Coasts* 40, 359–375.
- 58- pard, C.R. R. Loughland. 2002. Coral mortality and recovery in response to increasing temperature in the southern Arabian Gulf. *Aquatic. Ecosyst. Health Managment*. 5: 395–402.
- 59- Pogoreutz, C. Radecker, N. Cardenas, A. Gardes, A. Voolstra, C.R. Wild, C. 2017. Sugar enrichment provides evidence for a role of nitrogen fixation in coral bleaching. *Glob. Chang. Biol.* 23, 3838–3848. <https://doi.org/10.1111/gcb.13695>.
- 60- Possingham, H. P. Bode, M. & Klein, C. J. (2015). Optimal conservation outcomes require both restoration and protection. *PLoS biology*, 13(1), e1002052.
- 61- Principe, P.P. Bradley, P. Yee, S. Fisher, W.S. Johnson, E. Allen, P. Campbell, D. 2012. Quantifying coral reef ecosystem services. EPA/ 600/R-11/206. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park.
- 62- Ramanathan, K. Thenmozhi, M. George, S. Anandan, S. Veeraraghavan, B. Naumova, E. N. & Jeyaseelan, L. (2020). Assessing seasonality variation with harmonic regression: accommodations for sharp peaks. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1318.

- 73- Vardi, T. Hoot, W. C. Levy, J. Shaver, E. Winters, R. S. Banaszak, A. T. ... & Montoya-Maya, P. H. (2021). Six priorities to advance the science and practice of coral reef restoration worldwide. *Restoration Ecology*, 29(8), e13498.
- 74- Wilkinson, C.R. 2008. Status of Caribbean Coral Reefs After Bleaching and Hurricanes in 2005. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia.
- 75-Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., & Graham, N. A. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33(6), 1023-1034.
- 76- Wyatt, A.S.J. Leichter, J.J. Toth, L.T. Miyajima, T. Aronson, R.B. Nagata, T. 2019. Heat accumulation on coral reefs mitigated by internal waves. *Nat. Geosci.* 13, 28–34. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0486-4>.
- 77- Xu, Y. Vaughn, N.R. Knapp, D.E. Martin, R.E. Balzotti, C. Li, J. Foo, S.A. Asner, G.P. Coral Bleaching Detection in the Hawaiian Islands Using Spatio-Temporal Standardized Bottom Reflectance and Planet Dove Satellites. *Remote Sens.* 2020, 12, 3219. <https://doi.org/10.3390/rs12193219>.

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)



