



Investigating Long-Term Trends of Sea Level Anomalies in the Persian Gulf and the Parameters Affecting it Using Multi-Source Data

M. Sharif¹ and S. Attarchi^{2*}

Abstract

The trend of the sea level changes is seriously challenging the coastal cities around the globe. Changes are various in different geographical conditions. The semi-enclosed sea of the Persian Gulf experiences the anomalies with a higher rate in comparison to the world average. Therefore, it is quite important to investigate the degree of influence and correlation of governing parameters including, sea surface temperature (SST), air temperature at 2 meters above the surface, sea surface salinity (SSS), and horizontal wind speed in both east and north directions using a set of remote sensing data, hybrid (HYCOM), and reanalysis product data (ERA5) from 1993 to 2020 in the Persian Gulf. The long-term annual trend in the Persian Gulf shows the following changes; 3.9 mm/yr in the sea level, 0.02 °C/yr in SST, 0.024 °C/yr in air temperature at 2 m above the surface, -0.03 psu/yr in SSS, and -0.01 ms⁻¹/yr and 0.01 ms⁻¹/yr in horizontal speed of air moving respectively towards the East direction and the north direction. Also, according to the results of the monthly and annual correlation between these parameters with the sea level changes only correlation with SST with $R^2=0.6$ (p-value=0.04) and with SSS $R^2=0.4$ (p-value=0.03) were significant. The comparison of the results in monthly and annual scales shows that the sea level changes in the Persian Gulf do not show the same patterns. Rather, these changes are affected by different parameters in different time of the year.

Keywords: Remote Sensing, Satellite Altimetry, SST, Sea Level Anomalies.

Received: August 3, 2022

Accepted: November 14, 2022

بررسی روند بلندمدت تغییرات سطح آب خلیج فارس و عوامل مؤثر بر آن بر اساس داده‌های چند منبعی

مرتضی شریف^۱ و سارا عطاری^{۲*}

چکیده

روند تغییرات سطح آب دریاها یکی از چالش‌های جدی شهرهای ساحلی در جهان است. این تغییرات با توجه به شرایط مختلف جغرافیایی و تأثیرپذیری آن از عوامل مختلف، متفاوت است. یکی از مناطق مهم دستخوش تغییر، دریای نیمه محصور خلیج فارس است که سطح ناهنجاری‌های آن نسبت به متوسط جهانی بالاتر است. از این رو، میزان تأثیرگذاری و همبستگی پارامترهای دمای سطح دریا، دمای هوا از سطح ۲ متری، شوری سطح دریا، سرعت افقی باد در دو جهت شرق و شمال در خلیج فارس با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های سنجنش از دور، هیبریدی (HYCOM) و تجزیه و تحلیل بهبود یافته (ERA5) در دوره زمانی ۱۹۹۳-۲۰۲۰ بررسی شد. در روند بلند مدت سالانه تغییرات سطح دریا (در خلیج فارس) حاکی از افزایش (۳/۹ mm/yr)، دمای سطح دریا (۰/۰۲ °C/yr)، دمای هوا از سطح ۲ متری (۰/۰۲۴ °C/yr)، تغییرات شوری (۰/۰۳ psu/yr) و تغییرات سرعت افقی باد (۰/۰۱ ms⁻¹/yr) در جهت شرق و (۰/۰۱ ms⁻¹/yr) در جهت شمال است. همچنین، با توجه به نتایج همبستگی بین این پارامترها با تغییرات سطح آب دریا در مقیاس ماهانه تنها با دمای سطح دریا (p-value برابر با ۰/۰۴) و در مقیاس سالانه با شوری سطح دریا (p-value برابر با ۰/۰۳) $R^2=0.6$ و $R^2=0.4$ رابطه معنی‌داری مشاهده شد. مقایسه نتایج بدست آمده در دو مقیاس زمانی ماهانه و بین سالانه نشان می‌دهد، تغییرات سطح آب دریا در خلیج فارس الگوهای یکسانی ندارند. بلکه این تغییرات در شرایط زمانی مختلف از پارامترهای مختلف تأثیر می‌پذیرند.

کلمات کلیدی: سنجنش از دور، ماهواره‌های ارتفاع سنج، دمای سطح دریا،

ناهنجاری‌های سطح دریا.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۳

1- MSc. Graduate, Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: morteza.sharif@ut.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: satarchi@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.3.11.3](https://doi.org/10.117352347.1401.18.3.11.3)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، رشته سنجنش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه سنجنش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۱ امکان‌پذیر است.



معرض خطرات مختلف طبیعی و انسانی قرار دارند (Melet et al., 2020). در امتداد خطوط ساحلی در محیط‌های شهری در سراسر جهان، بالا آمدن سطح آب دریاها زیرساخت‌های لازم برای مشاغل محلی و صنایع منطقه‌ای را تهدید می‌کند. زیرساخت‌های مهم در این مناطق همچون جاده‌ها، پل‌ها، متروها، منابع آبی، چاه‌های نفت و گاز، نیروگاه‌ها، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، محل‌های دفن زباله همه در معرض خطر افزایش ارتفاع سطح دریاها قرار دارند. همچنین، افزایش سطح آب دریاها بویژه در مناطق ساحلی سبب وقوع طوفان‌های مرگبار و ویرانگر و سیلاب‌های مکرر در زمان جزر و مد می‌شود. برای کاهش اثرات این مخاطرات دریایی، برنامه‌های پایش مستمر مناطق ساحلی، سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار اولیه به طور فزاینده‌ای مورد نیاز است.

با گسترش تکنولوژی‌های ماهواره‌ای، اندازه‌گیری تغییرات سطح آب دریاها، دریاچه‌ها و حتی تالاب‌ها در سطح محلی امری دست‌یافتنی شده است. مشاهدات زمینی (EO)^۴ و به‌ویژه تکنولوژی‌های سنجش از دور ماهواره‌ای، اطلاعات بسیار ارزشمندی را ارائه می‌دهند: سنجنده‌های ماهواره‌ای امکان نظارت مؤثر بر تغییرات آب اقیانوس‌ها، دریاها و همچنین دریاچه‌های داخلی را با دید جامع از مناطق بزرگ، قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب و سری‌های زمانی پایدار فراهم می‌کنند. از جمله این تکنولوژی‌ها می‌توان به مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای اشاره کرد که از اکتبر ۱۹۹۲ یک نمای همدیدی شبه جهانی از تغییرات ارتفاع سطح دریا در سراسر کره زمین را بیش از ۳۰ سال ارائه می‌دهند (Legeais et al., 2018). اندازه‌گیری‌ها توسط ارتفاع‌سنج‌های راداری روی ۱۳ ماهواره مختلف جمع‌آوری شده‌اند که به طور منظم با هم مقایسه و کالیبره می‌شوند (Prandi et al., 2021). نتایج این داده‌های ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای همچنین به طور منظم با داده‌های زمینی از سواحل اندازه‌گیری جزر و مد یا به صورت محلی در سایت‌های زمینی مختلف یا در مقیاس جهانی با صدها داده در دسترس از دستگاه‌های اندازه‌گیری جزر و مد تأیید شده‌اند (Watson et al., 2015). از این رو، داده‌های ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای، اطلاعات ارزشمندی در مورد بررسی روند تغییرات سطح آب دریا از فضا به کاربران ارائه می‌دهند.

خلیج فارس از جمله مناطق مهم زمین است که از لحاظ منابع انرژی در اقتصاد جهانی نیز تأثیرگذار است. در سواحل این دریای نیمه محصور حدود ۲۵ میلیون نفر زندگی می‌کنند. تغییرات آب در این دریا مثبت و حدود ۴/۱ میلی‌متر در سال تخمین زده می‌شود. این تغییرات ناشی از بالا آمدن آب دریاها در سطح جهانی (با ۳/۶ میلی‌متر در سال)

یکی از مهم‌ترین اثرات بالقوه تغییرات آب و هوا، افزایش سطح آب دریاها است که طغیان مناطق ساحلی و جزایر، فرسایش خطوط ساحلی و تخریب اکوسیستم‌های مهم مانند تالاب‌ها و مانگرو را به دنبال دارد. نتایج مطالعات گذشته افزایش میانگین سطح جهانی دریاها (GMSL)^۱ و در پی آن تغییرات آب و هوایی را نشان می‌دهد (Kuo et al., 2021). افزایش سطح آب دریاها از ابتدای قرن بیستم در پی افزایش دمای هوای کره زمین، افزایش دمای اقیانوس‌ها (OHC)^۲ و ذوب یخچال‌های طبیعی در قطب‌های شمال و جنوبگان اتفاق افتاده است (Cheng et al., 2019; Hamlington et al., 2019). روند رو به افزایش در تغییرات سطح آب دریاها را می‌توان با تغییرات آب و هوایی در بازه‌های زمانی مختلف، هماهنگ دانست (Kuo et al., 2021). این تغییرات سالانه سطح جهانی دریاها بیشتر تحت سلطه ال‌نینو-نوسانات جنوبی (ENSO)^۳ قرار می‌گیرند (Hamlington et al., 2019; Hamlington et al., 2020). از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۰۹ ارتفاع سطح دریاها حدود ۲۱ تا ۲۴ سانتی‌متر افزایش یافته است (Church & White, 2011). اما در سال ۲۰۲۰، ارتفاع سطح دریاها (در سطح جهان) رکورد جدیدی را ثبت کرد و حدود ۹۱/۳ میلی‌متر بالاتر از سطح ۱۹۹۳ گزارش شد. انتظار می‌رود این تغییرات طی دهه‌ها یا حتی قرن‌های آینده ادامه یابد. بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته تا سال ۲۰۵۰ (بین ۰/۳-۰/۲ متر) و تا سال ۲۱۰۰ (بین ۱/۵-۰/۴ متر) ارتفاع سطح دریاها افزایش خواهد یافت (Horton et al., 2018). این تغییرات، پیامدهای گسترده‌ای برای جوامع ساحلی به همراه خواهد داشت. شناسایی، نسبت دادن و درک تغییرات روندهای معاصر در سطح دریا اهمیت زیادی در پیش‌بینی روند تغییرات ارتفاع سطح دریا در آینده و آماده‌سازی سازگاری جوامع ساحلی دارد. همچنین، برای ارزیابی آب و هوا، افزایش آگاهی عمومی و به طور کلی برای توسعه سیاست‌های سازگاری با تغییرات آب و هوا ضروری است. در این زمینه، مطالعه روند تغییرات ناهنجاری‌های آب دریاها به صورت محلی و در نوارهای ساحلی می‌تواند شناخت بیشتری به تغییرات در آینده برای جوامع محلی به همراه داشته باشد.

شهرهای ساحلی در سطح جهان در مقایسه با مناطق داخلی پرتراکم‌تر هستند (Small & Nicholls, 2003). بر اساس اطلس اقیانوس‌های سازمان ملل، ۸ شهر از ۱۰ شهر بزرگ جهان در نزدیکی ساحل قرار دارند. به نظر می‌رسد با افزایش تنش‌های آبی، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آبی در مناطق خشک داخلی نرخ افزایش جمعیت در این نوارهای ساحلی همچنان گسترش یابد. در عین حال، این مناطق در

است. گرچه در برخی از حوضه‌های اقیانوسی، ارتفاع سطح دریاها از زمان شروع ثبت ماهواره‌ها حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر افزایش یافته است. با این حال، تفاوت‌های منطقه‌ای به دلیل تنوع طبیعی در قدرت بادها و جریان‌های اقیانوسی وجود دارد که بر میزان و مکان ذخیره گرما در لایه‌های عمیق‌تر آب دریاها و اقیانوس‌ها تأثیر می‌گذارد. این عوامل سبب می‌شود تا مناطق محصور که به دریاها راه دارند تغییرات بیشتری نیز تجربه کنند. با توجه به شرایط عمق آب خلیج فارس (کم عمق در سواحل شمالی و شمال غربی) و شرایط نیمه محصور آن، ویژگی‌های دمایی سبب افزایش ناهنجاری‌ها می‌شود. از این رو، بررسی تغییرات در نوار ساحلی خلیج فارس بسیار حائز اهمیت است. با وجود مطالعات صورت گرفته در تغییرات ناهنجاری‌های سطح خلیج فارس، اطلاع از میزان تأثیرپذیری آن از پارامترهای مختلف جوی و فیزیکی آب دریا هنوز ناکافی است. بنابراین، هدف از این مطالعه، بررسی روند ناهنجاری‌های سطح آب خلیج فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع سطح ماهواره‌ای و داده‌های ناهنجاری سطح دریا (محصول MSLA-v2.0 تهیه شده از سایت <https://catalogue.ceda.ac.uk>) است. این ناهنجاری‌ها با توجه به تغییرات پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این عوامل شامل تغییرات الگوهای دمای سطح دریا، دمای هوای ۲ متری از سطح، شوری سطح دریا، سرعت باد در جهت‌های شرق و شمال از سطح ۱۰ متری با ناهنجاری‌های سطح دریا در دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۰ است. برای دست یافتن به میزان تأثیرگذاری پارامترهای مورد بررسی در روند بلندمدت سالانه و ماهانه با ناهنجاری‌های سطح دریا از رابطه همبستگی پیرسون استفاده شد. در این مطالعه همچنین الگوهای فصلی تغییرات هر پارامتر نیز تجزیه و تحلیل و ارزیابی شده است.

۲- داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه، شامل بخشی از دریای عمان، تنگه هرمز و خلیج فارس که بین ۲۳ تا ۳۱ درجه عرض شمالی و ۴۸ تا ۵۸ درجه طول شرقی قرار دارد، نمایش داده شده است. در این محدوده جغرافیایی ۹ کشور با خلیج فارس و دریای عمان هم مرز هستند. خلیج فارس به عنوان یک دریای نیمه محصور محسوب می‌شود (Lorenz et al., 2020). بیشترین عرض خلیج فارس حدود ۳۸۰ کیلومتر در قسمت شمال و کمترین عرض حدود ۶۰ کیلومتر در تنگه هرمز قرار دارد. بخش‌های شمالی خلیج فارس و همچنین نواحی غربی سواحل آن کمترین عمق (حدود ۵ متر) و بیشترین عمق آن

۲-۲- داده‌های تحقیق

مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. برای تغییرات ارتفاع سطح دریا از داده‌های ترکیبی که مجموعه‌ای از داده‌های چندین ماهواره ارتفاع سطح به همراه داده‌های سایت‌های ایستگاهی زمینی هستند (Prandi et al., 2021)، استفاده شد. همچنین، داده‌های سطح از دور دمای سطح دریا از سنجنده AVHRR²¹، داده‌های تجزیه و تحلیل مجدد^۵ شامل دمای هوا از سطح ۲ متری، سرعت افقی حرکت باد به سمت شرق^۶ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین و سرعت افقی باد در جهت شمال^۷ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین از داده‌های اقلیمی ERA5 و داده‌های شوری سطح دریا از مجموعه داده‌های هیبریدی (HYCOM)^۸ است (جدول ۱). داده‌های شوری سطح دریا به صورت ساعتی توسط وزارت نیروی دریایی آمریکا تهیه و معمولاً پس از ۴۸ ساعت از زمان آنالیز اولیه قابل دسترس خواهند بود. این داده‌ها به صورت روزانه از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین فراخوانی و سپس میانگین ماهانه و سالانه آن‌ها در بازه ۱۹۹۳-۲۰۲۰ محاسبه شد. واحد این داده‌ها (Practical Salinity Unit) است.

داده‌های ماهواره‌ای دمای سطح دریا (SST)^۹ از راديوتر با وضوح بسیار بالا نسخه ۵ با قدرت تفکیک ۴ کیلومتر به دست آمد که طولانی‌ترین سری زمانی SST اندازه‌گیری فیزیکی از فضای موجود در سطح اقیانوس جهانی است. توسعه AVHRR SST توسط مرکز ملی داده‌های اقیانوس شناسی (NODC)^{۱۰} توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA)^{۱۱} انجام شده است. AVHRR یک حسگر اسکن فضایی با مدار قطبی است. این ماهواره در سال ۱۹۷۸ در مدار زمین قرار گرفته است (López García, 2020).

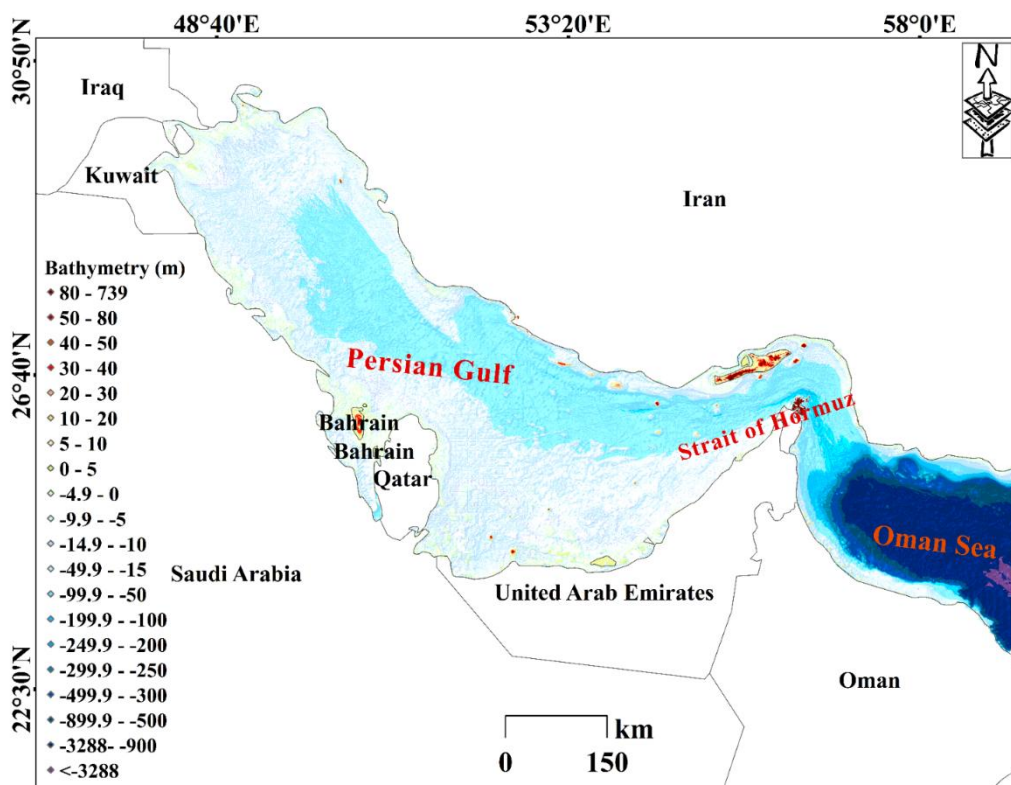


Fig. 1- The model bathymetry of the Persian Gulf

شکل ۱- نقشه عمق آب در خلیج فارس

داده‌های SST توسط AVHRR شامل دمای روز و شب در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۵ روزه، ماهانه و سالانه است. داده‌های میانگین ماهانه و روزانه در مطالعه حاضر استفاده شده است. این داده‌ها در واحد کلون هستند که به سانتی‌گراد تبدیل شده‌اند.

داده‌های SST توسط AVHRR شامل دمای روز و شب در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۵ روزه، ماهانه و سالانه است. داده‌های میانگین ماهانه و روزانه در مطالعه حاضر استفاده شده است. این داده‌ها در واحد کلون هستند که به سانتی‌گراد تبدیل شده‌اند.

۳-۲- مشاهدات تغییرات سطح اقیانوس‌ها و خلیج فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع سنج

در این مطالعه، برای تخمین روندهای افزایش سطح دریا^{۱۲} از داده‌های ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای و داده‌های آنومالی سطح دریا^{۱۳} محصول MSLA-v2.0 از سرویس تغییرات آب و هوایی کوپرنیک^{۱۴} استفاده شد.

سری مجموعه داده‌های تجزیه و تحلیل مجدد ERA5 از جمله کامل‌ترین تصویر موجود از آب و هوای گذشته را ارائه می‌دهد (Hersbach et al., 2020). این داده‌ها ترکیبی از مشاهدات با پیش‌بینی‌های کوتاه مدت آب و هوا هستند که با مدل‌های پیش‌بینی آب و هوا جدید تکرار می‌شوند (Hersbach et al., 2020; Nogueira et al., 2021). از این رو، برای درک تغییرات آب و هوایی گذشته و شرایط آب و هوایی کنونی حائز اهمیت هستند. محصول ERA5 داده‌هایی را از سطح زمین تا بالای اتمسفر برای متغیرهایی مانند دمای هوا، باد، بارندگی، دمای سطح دریا و ارتفاع موج اقیانوس‌ها ارائه می‌دهد. این داده‌ها ظرف ۵ روز پس از تولید در دسترس کاربران قرار می‌گیرند (Nogueira et al., 2021). در این تحقیق بررسی همبستگی بین داده‌های ناهنجاری‌های سطح دریا (محصول MSLA-

اندازه‌گیری‌های رادار ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای را می‌توان با مدارهای فضایی دقیقاً شناخته شده برای اندازه‌گیری سطح دریا در سطح جهانی با دقت بی‌سابقه‌ای ترکیب کرد. مجموعه‌ای از ماموریت‌های ماهواره‌ای که با TOPEX/Poseidon در سال ۱۹۹۲ آغاز شد و با Jason-1 (2001-2013)، Jason-2 (2008-2019) و Jason-3 از ۲۰۱۶ تا کنون ادامه یافته است.

Table 1- Detailed of the data used in the research

جدول ۱- جزئیات داده‌های مورد استفاده تحقیق

Data	Variable	Description	Units	Time span	Reference
AVHRR	SST	Sea surface temperature	k	1993-2020	https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset
HYCOM	SSS ²²	Sea surface salinity-0	psu	1993-2020	HYCOM.org
ERA5	2m temperature (air 2m)	Air temperature at 2 m above the earth surface	k	1993-2020	https://cds.climate.copernicus.eu
ERA5	10m u-component of wind	The horizontal speed of air moving towards East, at a height of ten meters above the earth surface	m s ⁻¹	1993-2020	https://cds.climate.copernicus.eu
ERA5	10m v-component of wind	The horizontal speed of air moving towards North, at a height of ten meters above the earth surface	m s ⁻¹	1993-2020	https://cds.climate.copernicus.eu
TOPEX/Poseidon, Jason-1,2 &3	Altimetry data		mm	1993-2020	www.star.nesdis.noaa.gov
Sea Level Anomalies	SLA	MSLA_v2.0	m	1993-2015	https://catalogue.ceda.ac.uk

سری‌های زمانی در دوره‌های ماهانه و همچنین سالانه برای نوارهای ساحلی غربی، شمالی و شرقی خلیج فارس به صورت جداگانه بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این کار جهت مشاهده تغییرات در دوره زمانی مورد مطالعه و سپس مقایسه آن با داده‌های آلتیمتری منطقه صورت گرفت.

۳- روش تحقیق

در شکل ۳ روند کلی تحقیق ارائه شده است. در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیرگذاری تغییرات الگوهای چهار پارامتر دمای سطح دریا، شوری سطح دریا، سرعت افقی باد در دو جهت شرق و شمال در ارتفاع ۱۰ متری از سطح آب، دمای هوای ۲ متری از سطح با تغییرات سطح آب دریا در خلیج فارس بین سال‌های ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۲۰ تجزیه و تحلیل شد. تمرکز اصلی تحقیق بر روی تغییرات الگوهای سطح آب دریا در مقیاس منطقه‌ای خلیج فارس (هم در بعد مکانی و هم زمانی) است. همچنین، تأثیرگذاری پارامترهای مورد مطالعه بر نوسانات سطح آب خلیج فارس بررسی شده است. ابتدا داده‌های تحقیق از دو طریق شامل سایت‌های ارائه‌دهنده داده‌های مورد بررسی و پلتفرم گوگل ارث انجین دریافت شد. در شکل ۳ تفاوت رنگ در داده‌ها بیانگر روش‌های دریافت است. پردازش‌های اولیه داده‌های دمای سطح آب، دمای هوا از سطح ۲ متری و داده‌های جهت باد از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین^{۱۷} صورت گرفته است.

میانگین سطح آب دریا هر ۱۰ روز یکبار با پوشش تقریباً جهانی از سطح اقیانوس‌های جهان بین عرض‌های ۶۶ درجه شمالی تا جنوبی به دست می‌آید (Church & White, 2011). عدم قطعیت این داده‌ها حدود ۳-۴ میلی‌متر (برای Jason-1 تا Jason-3) برآورد شده است. این داده‌ها یک تلاش مشترک بین NOAA، مرکز ملی فرانسه (CNES)^{۱۵} و سازمان اروپایی برای بهره‌برداری از ماهواره‌های هواشناسی (EUMETSAT)^{۱۶} است. این داده‌ها برای آگاهی از روند تغییرات در سطح جهانی و محلی برای خلیج فارس از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۱ دریافت و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل ۲ روند تغییرات سطح آب خلیج فارس و متوسط سطح جهانی دریاهای از داده‌های ارتفاع سنج ماهواره‌ای بین سال‌های ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۲۱ ارائه شده است. این داده‌ها در سطح جهانی و منطقه‌ای از طریق سایت www.star.nesdis.noaa.gov در دسترس کاربران قرار داده شده است.

در این تحقیق همچنین، ناهنجاری‌های سطح آب دریا از نسخه MSLA-v2.0 محصول متغیر آب و هوایی سطح دریاهای از تغییرات آب و هوایی ازناس فضایی اروپا استفاده شد. این محصول داده‌های به‌روز شده از نسخه‌های قبلی محصول 1.1 سازمان آب و هوایی ازناس فضایی اروپا است (Legeais et al., 2018). این داده‌ها با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و قدرت تفکیک زمانی ماهانه به صورت جهانی از سال ۱۹۹۳ تا پایان ۲۰۱۵ در دسترس کاربران قرار دارد.

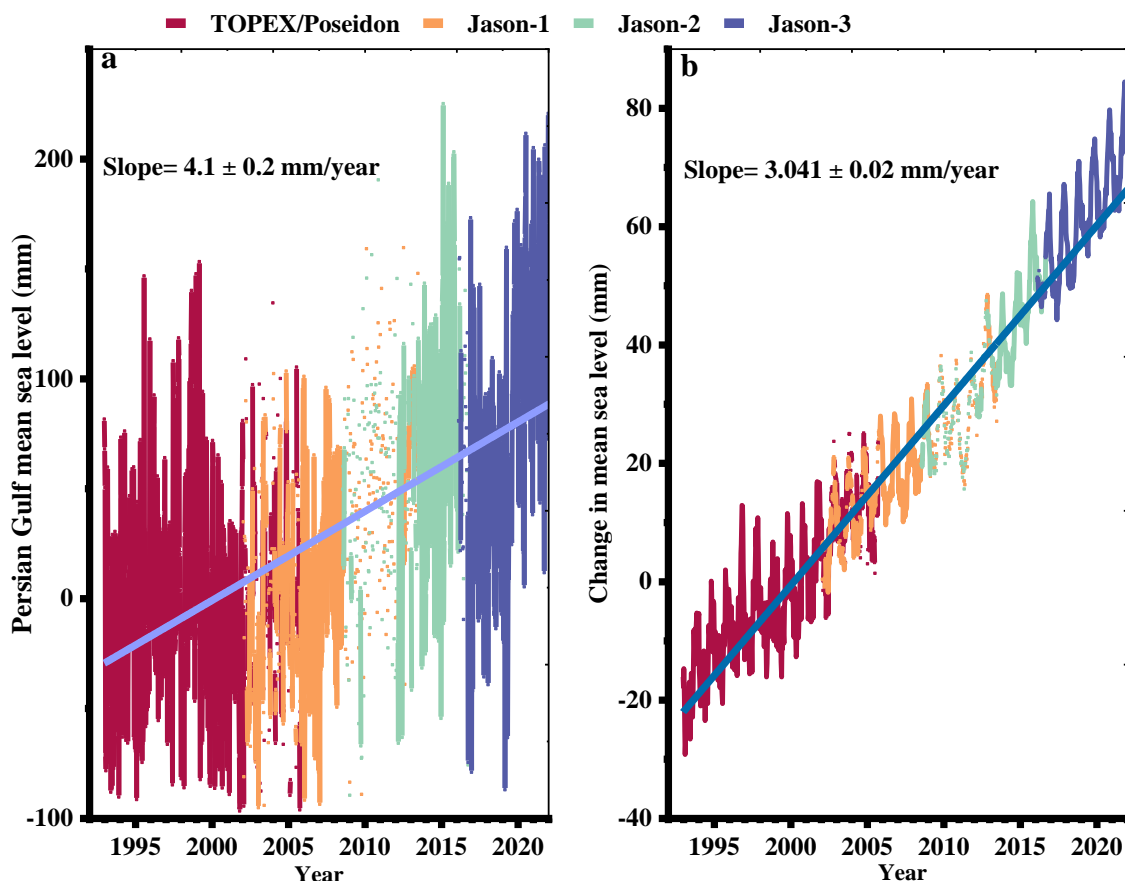


Fig. 2- Satellite altimetry-based anomalies for a) Persian Gulf and b) global mean sea level for the period of 1993 to December 2020

شکل ۲- (a) ناهنجاری‌های سطح خلیج فارس و (b) سطح جهانی اقیانوس‌ها بر اساس داده‌های ارتفاع سنج ماهواره‌ای از ۱۹۹۳ تا دسامبر ۲۰۲۰

در روندهای بین سالانه و ماهانه تجزیه و تحلیل شد. برای شناخت بهتر، تغییرات الگوهای فضایی در سطح خلیج فارس، برای هر پارامتر به صورت سالیانه و ماهانه در دوره زمانی ۱۹۹۳-۲۰۲۰ برای داده‌های شوری، دما و جهت‌های باد و ۱۹۹۳-۲۰۱۵ برای ناهنجاری‌های سطح آب خلیج فارس نیز ترسیم شد. در نهایت با ارزیابی همبستگی بین این پارامترها با ناهنجاری‌های سطح آب خلیج فارس در بازه زمانی ماهانه و سالیانه، میزان تأثیرگذاری و ارتباط بین آنها بدست آمد.

۳-۱- محاسبات و تجزیه تحلیل آماری تحقیق

روند تغییرات بلندمدت با رگرسیون خطی و همبستگی پیرسون برای هر پارامتر به صورت جداگانه محاسبه شد. رگرسیون خطی یک روش آماری برای مدل‌سازی رابطه با برازش یک معادله خطی بین دو متغیر توضیحی و متغیر وابسته است (Eberly, 2007).

سپس، نتایج بدست آمده مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. این پلتفرم که قادر به پردازش بسیاری از تصاویر ماهواره‌ای است (Ghorbanian et al., 2020; Gorelick et al., 2017) در دسامبر ۲۰۱۰ راه‌اندازی شد و روز به روز در حال گسترش است؛ چراکه سبب دسترسی و کاهش زمان پردازش داده‌های ماهواره‌ای می‌شود (Ghorbanian et al., 2020) و همچنین با در اختیار قرار دادن تصحیحات یکسان تصاویر ماهواره‌ای سبب شده است که اختلاف نتایج در مطالعات متعدد بر روی یک پدیده یکسان به حداقل ممکن برساند.

پس از پردازش و دریافت داده‌ها، روند تغییرات با قدرت تفکیک روزانه و ماهانه از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین با توجه به ماسک حوضه خلیج فارس بررسی شد. سپس، مقادیر بدست آمده به میانگین ماهانه و سالانه تبدیل شد. همچنین، داده‌های ناهنجاری سطح آب خلیج فارس و داده‌های آلتیمتری از طریق سایت‌های ارائه‌دهنده دریافت و

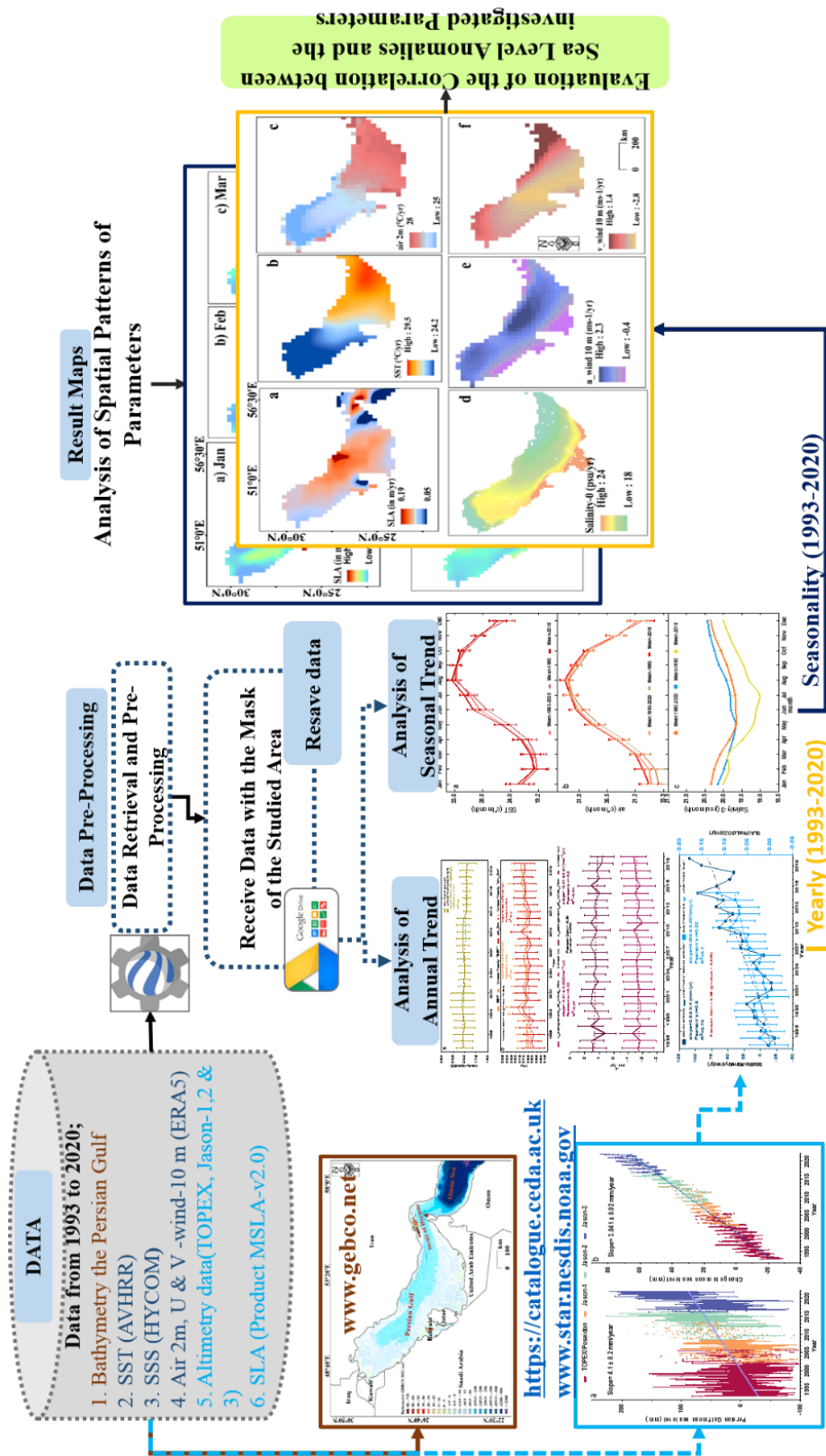


Fig. 3- Flowchart of the research method

شکل ۳- فلوجارت روش تحقیق

در این مطالعه، از رگرسیون خطی برای تعریف روابط بین پارامترها (متغیرهای وابسته) با زمان (متغیر توضیحی) در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ استفاده شد. با توجه به اینکه تغییرات الگوهای هر پارامتر در ماه‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد، دو دوره بلند مدت بین سالانه و ماهانه (۱۹۹۳-۲۰۲۰) در نظر گرفته شد. روند مثبت و منفی همبستگی‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ با ضریب همبستگی پیرسون بدست آمد که این مقادیر نشان دهنده رابطه معنی‌دار هر پارامتر در روند بلند مدت سالانه و ماهانه با ناهنجاری‌های سطح آب خلیج فارس است.

۴- نتایج

۴-۱- الگوی مکانی پارامترهای مورد بررسی در سطح خلیج فارس

متوسط ناهنجاری‌های سطح آب دریا از ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵، دمای سطح دریا، دمای هوا از سطح ۲ متری، شوری سطح دریا، سرعت باد در جهت شرق و شمال در سطح خلیج فارس بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۰ به ترتیب در شکل ۴، a، b، c، d، e، f نشان داده شده است. متوسط ناهنجاری‌های سالانه سطح آب خلیج فارس، تهیه شده از داده‌های میانگین ماهانه ارتفاع سطح دریا که تقریباً از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ برای داده‌های ناهنجاری‌های سطح دریا (SLA)^{۱۸} نشان داد، بیشترین ناهنجاری سطح آب خلیج فارس در بخش‌های شرقی واقع در سواحل ایران، جنوبی (سواحل امارات متحده عربی) و غربی همچون بخش‌های از سواحل بحرین و قطر مشاهده می‌شود (شکل ۴-a). بالاترین آنومالی بلند مدت بین ۰/۱ تا ۰/۲ متر در سال در سواحل ایران مشاهده شد. این محدوده تغییرات به صورت گردابی در مرکز خلیج فارس در شکل ۴-a قابل مشاهده است. همچنین، در دو بخش از تنگه هرمز این تغییرات به صورت متمرکز در سواحلی غربی این تنگه که راه پیوستن خلیج فارس به آب دریاهای آزاد است، وجود دارد. در این نواحی عمق آب بین ۵۰ تا ۲۰۰ متر است (شکل ۱). همچنین با توجه به انحراف مطلق میانگین ناهنجاری‌های سطح دریا، بخشی از سواحل عربستان و امارات متحده عربی نسبت به دیگر بخش‌های خلیج فارس بیشتر است.

برای دو پارامتر دمای سطح دریا و دمای هوا از سطح ۲ متری، بخش‌های شمالی خلیج فارس دمای پایین‌تر نسبت به بخش‌های جنوبی بویژه جنوب غربی دارند. اختلاف دما در این دو بخش از سطح خلیج فارس برای دمای سطح دریا ۳ درجه سانتی‌گراد (در ۲۷ سال) و برای دمای هوا از سطح حدود ۴ درجه سانتی‌گراد (در ۲۷ سال) است (شکل ۴-b و ۴-c). با توجه به شرایط عمق آب خلیج فارس به نظر

می‌رسد هرچه عمق آب بیشتر می‌شود، میزان دما در این بخش‌ها تا حدودی افزایش می‌یابد.

در دوره زمانی ۱۹۹۳-۲۰۲۰ اختلاف تغییرات مکانی شوری سطح دریا در سطح خلیج فارس حدود ۶ psu بدست آمد. بیشترین میزان شوری حدود ۲۴ psu در سواحل غربی خلیج فارس، بین ۲۱-۲۳ psu در بخش‌های شمالی که به صورت نواری شکل در سمت نوار ساحلی غربی امتداد می‌یابد، مشاهده شد. پایین‌ترین میزان شوری سطح دریا نیز با ۱۸ psu در شمالی‌ترین سواحل خلیج فارس وجود دارد که می‌تواند ناشی از ورود آب رودخانه‌های بزرگی همچون اروند و کارون باشد که سبب کاهش میزان شوری آب در این بخش از خلیج فارس می‌شود (شکل ۴-d). در سواحل شرقی که به آبراهه تنگه هرمز نزدیک‌تر است، از میزان شوری سطح آب خلیج فارس نسبت به بخش‌های دیگر کاسته می‌شود.

جهت باد به سمت شرق با اختلاف بین $2/1 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$ در بخش مرکزی خلیج فارس، نسبت به سواحل غربی و بخش‌هایی از سواحل شرق مشاهده شد (شکل ۴-e). اما تغییرات مکانی سرعت باد در جهت شمال، بیشترین میزان سرعت باد را با $1/4 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$ در تنگه هرمز و تا حدودی نوار شمالی خلیج فارس نشان داد (شکل ۴-f). پایین‌ترین میزان سرعت باد با $2/8 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$ در بخش مرکزی خلیج فارس است که به سمت سواحل جنوب غربی این حوضه تداوم می‌یابد (شکل ۴-f). همانطور که در شکل ۴-f و ۴-e نشان داده شده است، جریان باد در سواحل مختلف خلیج فارس متفاوت است که با تغییر جهت، میزان سرعت آنها نیز تغییر می‌یابد.

۴-۲- روند بلند مدت ناهنجاری‌های سالانه پارامترهای مورد بررسی

تغییرپذیری سطح آب خلیج فارس در مقیاس بین سالانه به طور جداگانه با استفاده از هر دو نوع داده در دسترس، تجزیه و تحلیل و در شکل ۵ نشان داده شده است. شیب روند سالانه سطح آب خلیج فارس بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ از داده‌های SLA حدود ۰/۰۴ متر در سال با $R^2=0/7$ بدست آمد که با نتایج داده‌های ارتفاع سنج ماهواره‌ای با $3/9$ متر در سال و $R^2=0/74$ تقریباً روند یکسانی از افزایش ارتفاع سطح دریا در این حوضه نشان می‌دهد (شکل ۵). تغییرات بدست آمده از هر دو نوع داده با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۵ در سطح اطمینان ۹۵٪ کاملاً معنی‌دار ($p\text{-value}=0.000$) است. تغییرات سطح آب خلیج فارس مثبت است.

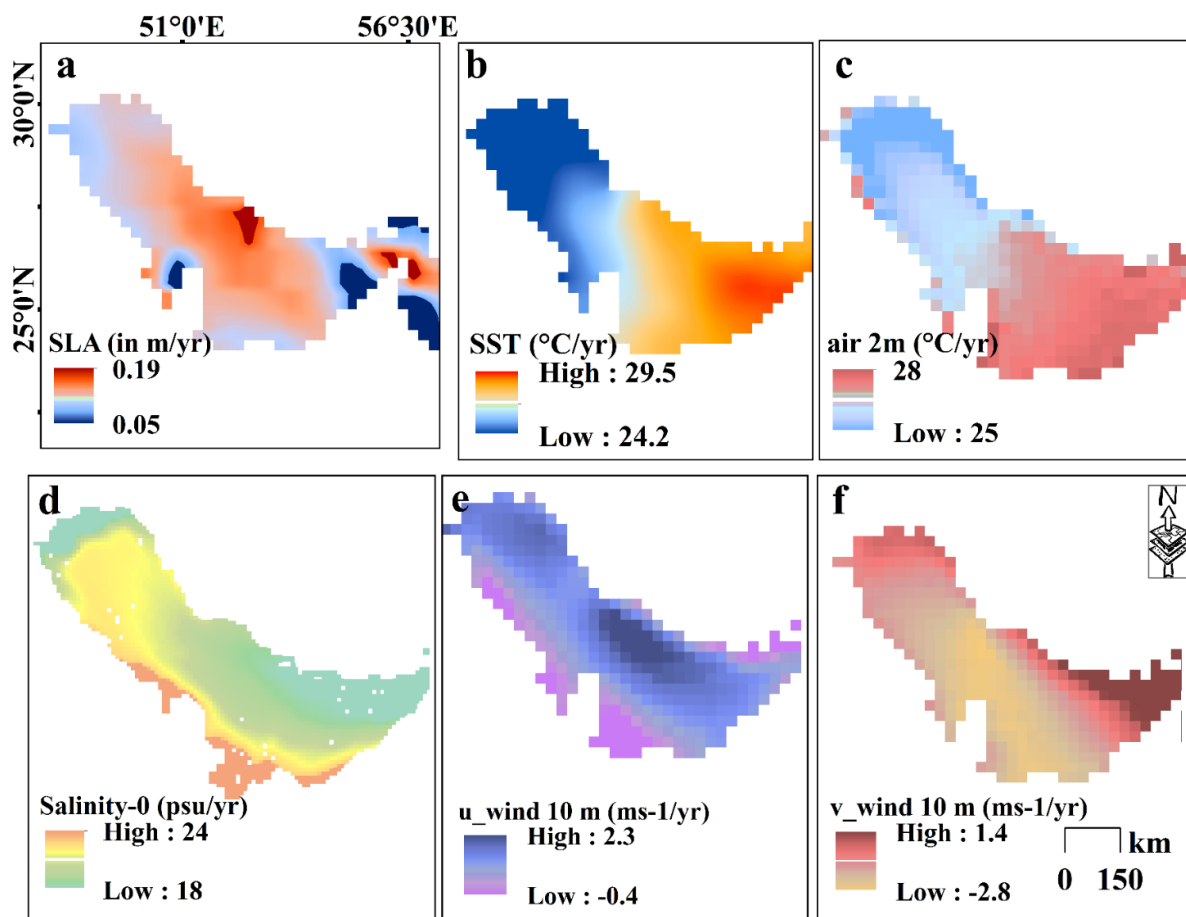


Fig. 4- Spatial patterns of a) mean sea level anomalies, b) SST, c) air 2 m, d) Salinity-0, e) 10m u_component of wind, and f) 10m v_component of wind in the Persian Gulf.
 شکل ۴- (a) الگوی مکانی متوسط ناهنجاری سطح دریا، (b) دمای سطح دریا، (c) دمای هوا از سطح ۲ متری، (d) شوری سطح دریا، (e) سرعت افقی حرکت باد به سمت شرق و (f) سمت شمال از سطح ۱۰ متری در خلیج فارس.

بیشترین دامنه تغییرات میزان شوری در سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۹۳ و کمترین میزان بین سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۳ به ترتیب با ۲/۳ و ۰/۸ psu بوده است (شکل ۴-۶). اما تغییرات هر دو پارامتر دمای سطح دریا و دمای هوای ۲ متری از سطح خلیج فارس به ترتیب با ۰/۲ و ۰/۰۲۴ درجه سانتی‌گراد در سال افزایشی بود (شکل ۴-۶). بین هر دو پارامتر دمای هوا و دمای سطح دریا با همبستگی پیرسون ۰/۹ در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه معنی‌داری (p-value=0.000) مشاهده شد (شکل ۴-۶).

روند تغییرات سالانه پارامترهای شوری سطح دریا (Salinity-0)، دمای سطح دریا (SST) و دمای هوا ۲ متری از سطح آب خلیج فارس به صورت جداگانه تجزیه و تحلیل شد. روند بلند مدت شوری سطح با ۰/۰۳ psu/yr - کاهش بود. پایین‌ترین میزان سالانه شوری سطح آب در طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ با متوسط ۱۹/۴ psu/yr مشاهده شد.

گرچه این تغییرات با توجه به توپوگرافی آن در سواحل مختلف متفاوت است. در بخش‌های شمالی خلیج فارس روند سرعت این ناهنجاری‌ها نسبت به بخش‌های دیگر پایین‌تر نشان می‌دهد. همچنین، در طی ماه‌های مختلف سال تغییرات متفاوت است. در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ رویدادهای کاهش شوری تغییرات آب خلیج فارس قابل مشاهده بود، درحالی‌که در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ روند تغییرات افزایشی بود (شکل ۵).

تغییرات سالانه پارامترهای شوری سطح دریا (Salinity-0)، دمای سطح دریا (SST) و دمای هوا ۲ متری از سطح آب خلیج فارس به صورت جداگانه تجزیه و تحلیل شد. روند بلند مدت شوری سطح با ۰/۰۳ psu/yr - کاهش بود. پایین‌ترین میزان سالانه شوری سطح آب در طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ با متوسط ۱۹/۴ psu/yr مشاهده شد.

۳-۴- ضریب همبستگی سالانه بین پارامترهای مورد بررسی تحقیق با ناهنجاری‌های سطح خلیج فارس

همبستگی سالانه بین ناهنجاری‌های سطح دریا با پارامترهای مورد بررسی تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. در هر دو نوع داده‌های ارتفاع سنج ماهواره‌ای و ناهنجاری‌های سطح دریا (محصول v2.0) به ترتیب با شوری سطح دریا با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۵- و ۰/۴- رابطه معنی‌داری (p-value=0.02, 0.03) مشاهده شد. اما بین این ناهنجاری‌های سطح دریا در خلیج فارس با چهار پارامتر دمایی سطح دریا، دمایی هوا و سرعت باد در جهت شرق و شمال رابطه معنی‌داری مشاهده نشد.

است (value=0.000) (شکل ۷). روند تغییرات باد در سال‌های مورد مطالعه به صورت سینوسی (گاهی کاهشی و گاهی افزایشی) بود (شکل ۷). این تغییرات گرچه بین هر دو پارامتر سرعت باد در جهت‌های شرق و شمال برعکس هم مشاهده شد، اما تغییرات افزایشی و کاهشی برای سرعت باد در جهت شرق با پارامترهای دمایی سطح دریا و دمایی هوا بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۴ هماهنگی بیشتری دارد.

دامنه تغییرات برای سرعت باد در جهت شرق بین $-1/63 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$ تا $0/5$ با بیشترین سرعت باد در جهت شرق برای سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۶ حدود $1/6 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$ بود (شکل ۷). در حالی که، دامنه تغییرات برای سرعت باد در جهت شمال $-1/3 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$ تا -2 با متوسط بیشترین میزان سرعت باد (حدود $-1/3 \text{ ms}^{-1}/\text{yr}$) در سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰، کمترین میزان سرعت باد (حدود ms^{-1}/yr) در سال ۲۰۱۱ مشاهده شد (شکل ۷).

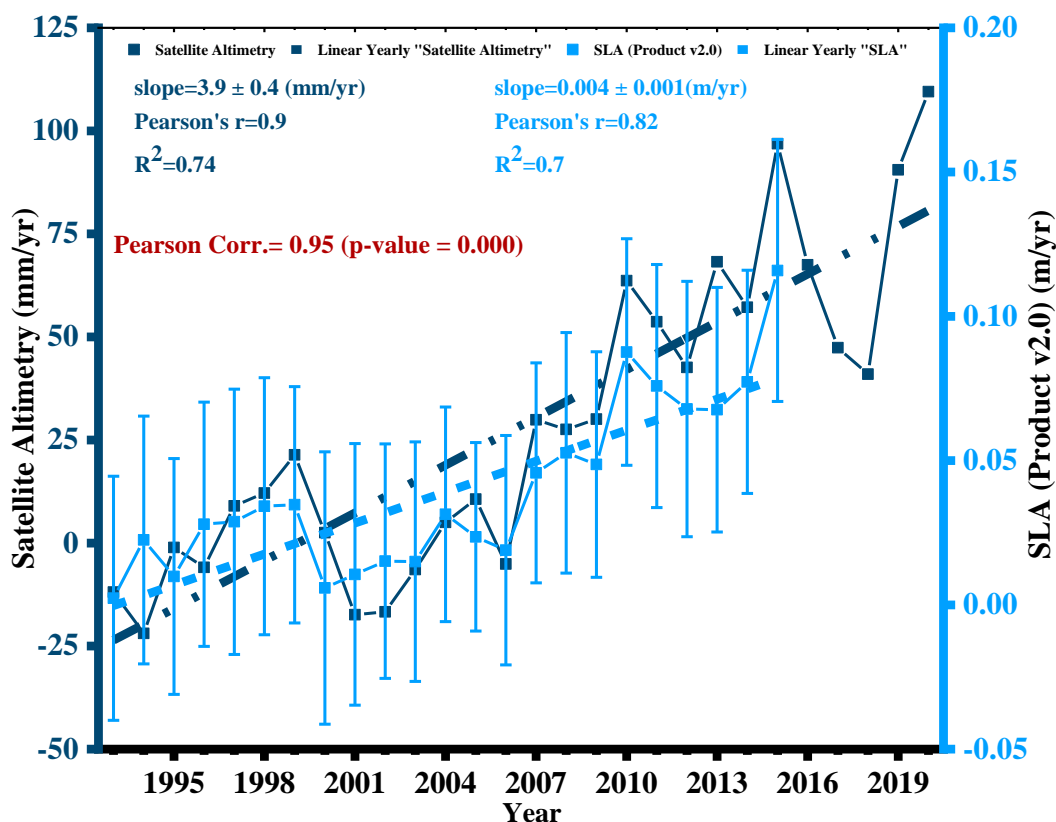


Fig. 5- Persian Gulf mean sea level time series between January 1993 and December 2020 based on satellite altimetry data and SLA data from (<https://catalogue.ceda.ac.uk>) of 1993-2015

شکل ۵- متوسط ناهنجاری‌های سطح آب خلیج فارس از ژانویه ۱۹۹۳ تا دسامبر ۲۰۲۰ (بر اساس داده‌های ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای) و داده‌های ناهنجاری سطح دریا از سایت (<https://catalogue.ceda.ac.uk>) بین ۱۹۹۳-۲۰۱۵

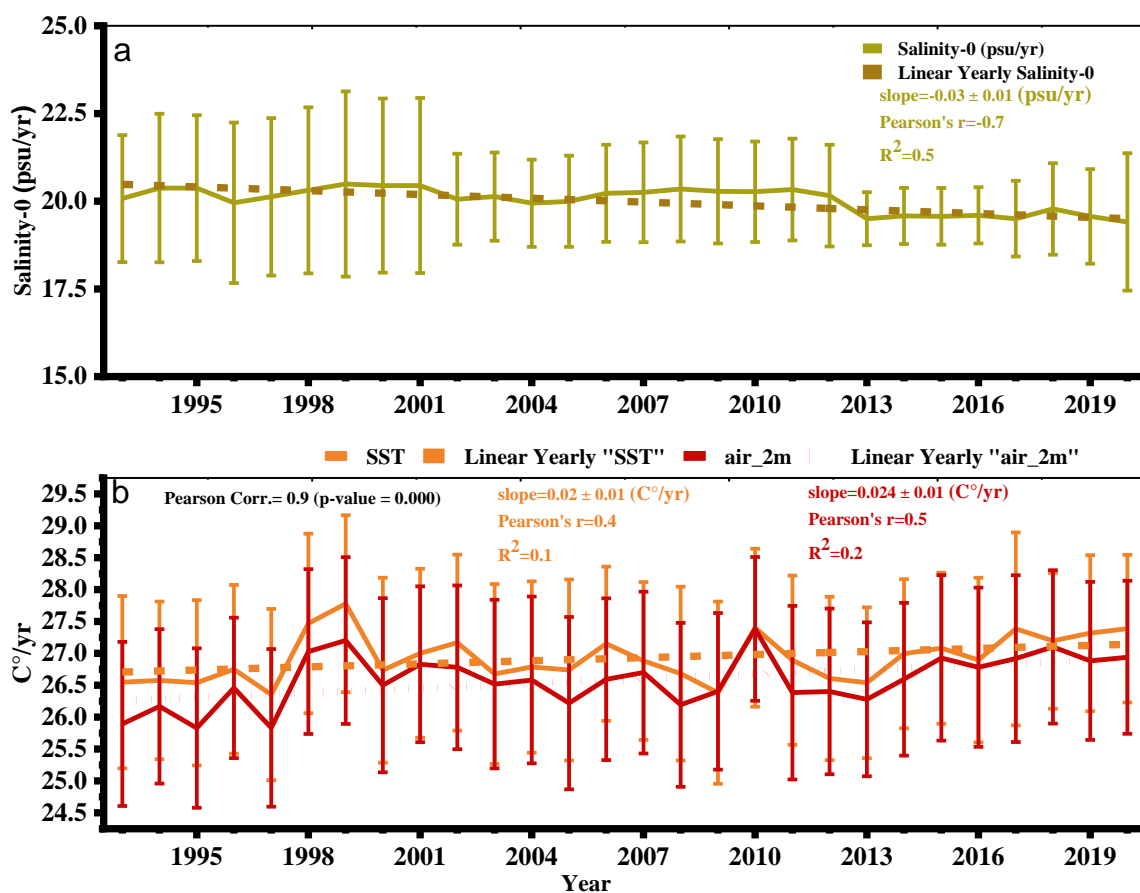


Fig. 6- Annual trend of a) Salinity-0, b) SST and air 2m above the sea surface for the Persian Gulf
 شکل ۶- (a) روند سالانه شوری سطح دریا، (b) دمای سطح دریا و دمای هوا از سطح ۲ متری سطح خلیج فارس

گرچه بین ماه‌های ژانویه تا جولای سطح آب دریا در بخش‌های شمال و سواحل غربی خلیج فارس پایین است (شکل ۹-۹ تا ۹-۱۰)، اما به تدریج از ماه آگوست سطح وسیعی از بخش‌های خلیج فارس ناهنجاری بالاتر از ۰/۱ متر دارند (شکل ۹-۱۱ تا ۹-۱۲). سپس، در دو ماه نوامبر و دسامبر این ناهنجاری‌ها بیشترین میزان را در سواحل غربی دارد (شکل ۹-۱۳ تا ۹-۱۴). حداکثر ناهنجاری‌های سطح دریا در یک چرخه فصلی در ماه نوامبر و حداقل آن در ماه آوریل مشاهده می‌شود (شکل ۹-۱۵). حداکثر میزان ناهنجاری‌ها در بخشی از سواحل کشور امارات متحده عربی و سواحل تنگه هرمز به نسبت دیگر سواحل خلیج فارس بیشتر است (شکل ۹-۱۶). این تغییرات نشان می‌دهد در فصل مرطوب سال (پاییز و زمستان) نسبت به فصل گرم سال (بهار و تابستان) ناهنجاری‌ها در سطح خلیج فارس بیشتر است که این تفاوت بین ۰/۱-۰/۴ متر برآورد شده است. با در نظر گرفتن شرایط دمایی آب دریا، این تغییرات می‌تواند ناشی از انبساط دمایی باشد که سبب افزایش در ماه‌های سرد سال و کاهش در ماه‌های گرم سال می‌شود.

۴-۴- ناهنجاری‌های ماهانه پارامترهای مورد بررسی در سطح خلیج فارس

الگوی آنومالی سطح آب خلیج فارس برای ماه‌های مختلف سال در شکل ۸ نشان داده شده است. حداکثر ناهنجاری سطح دریا در خلیج فارس برای سال ۱۹۹۳ (۰/۱ متر در سال) و ۲۰۱۵ (۰/۳ متر در سال) بدست آمد. متوسط این ناهنجاری‌ها بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ بین ۰/۰۱ متر در ماه در ماه‌های فوریه تا می و ۰/۱ متر در ماه در ماه نوامبر است. این تغییرات در سال ۲۰۱۵ نسبت به ۱۹۹۳ افزایش یافته (حدود ۰/۲ متر) است. بیشترین ناهنجاری‌های افزایشی از سطح آب در خلیج فارس در ماه‌های اکتبر و نوامبر مشاهده شد (شکل ۸). همچنین، الگوهای مکانی آنومالی سطح دریا در خلیج فارس برای مشاهده تغییرات در سواحل مختلف به صورت ماهانه تجزیه و تحلیل شد. در شکل ۹ این الگوی تغییرات ناهنجاری‌ها ارائه شده است. بیشترین میزان ناهنجاری‌ها بین ۰/۱۳-۰/۰۶ متر در ماه در سواحل غربی تنگه هرمز، سواحل کشور ایران، بحرین و امارات متحده عربی رخ می‌دهد (شکل ۹).

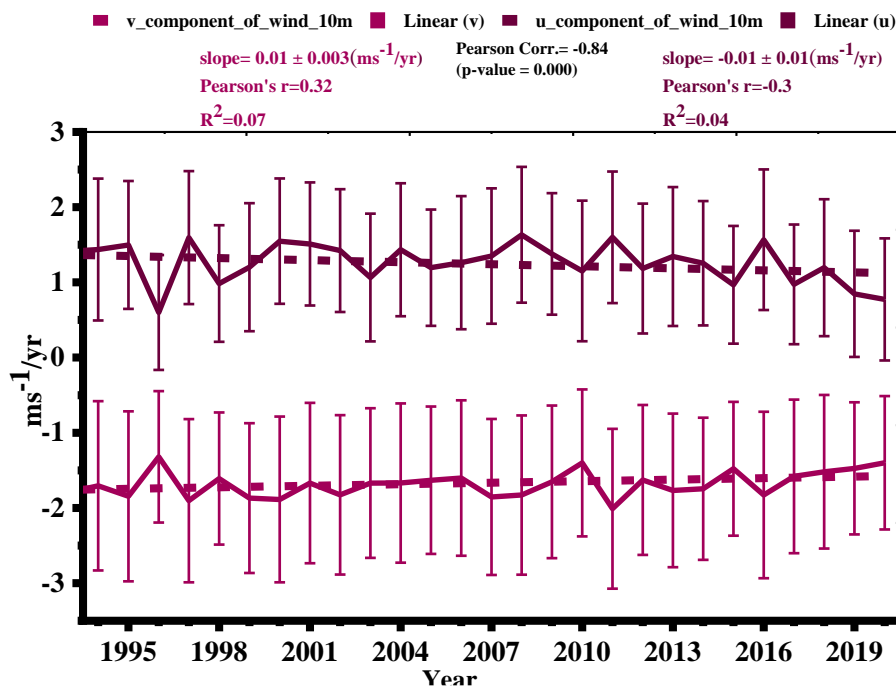


Fig. 7- Annual trend of 10m v_component and 10m u_component of wind for the Persian Gulf
 شکل ۷- روند سالانه سرعت افقی حرکت باد به سمت شرق و سرعت افقی حرکت باد به سمت شمال از سطح ۱۰ متری در خلیج فارس

Table 2- The Pearson's correlation coefficient for the relationship between SST ($^{\circ}\text{C}/\text{yr}$), air 2m ($^{\circ}\text{C}/\text{yr}$), 10m u-wind (ms^{-1}/yr), 10m v-wind (ms^{-1}/yr), and salinity-0 (psu/yr) and the parameters of SLA and altimetry data (Correlation coefficient at the confidence level of 95%)

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین دمای سطح دریا، دمای هوا از سطح ۲ متری، سرعت افقی حرکت باد به سمت شرق و سمت شمال از سطح ۱۰ متری و شوری سطح دریا با داده‌های ارتفاع سنج و ناهنجاری‌های سطح دریا، (ضریب همبستگی در سطح اطمینان ۹۵٪)

Pearson Correlations		Altimetry data	SST	SLA (v2.0)	v wind	u wind	2m Air	Salinity-0
Altimetry data	Pearson Corr.	1						
	p-value	--						
SST	Pearson Corr.	0.2	1					
	p-value	0.5	--					
SLA (Product v2.0)	Pearson Corr.	0.9	0.2	1				
	p-value	0.000	0.4	--				
v_wind_10m	Pearson Corr.	0.1	0.2	0.2	1			
	p-value	0.6	0.4	0.3	--			
u_wind_10m	Pearson Corr.	-0.2	-0.3	-0.2	-0.8	1		
	p-value	0.5	0.1	0.3	0.000	--		
air_2m	Pearson Corr.	0.3	0.9	0.4	0.4	-0.42	1	
	p-value	0.2	0.000	0.08	0.06	0.04	--	
Salinity-0	Pearson Corr.	-0.5	0.2	-0.4	-0.3	0.4	0.08	1
	p-value	0.02	0.4	0.03	0.2	0.08	0.7	--

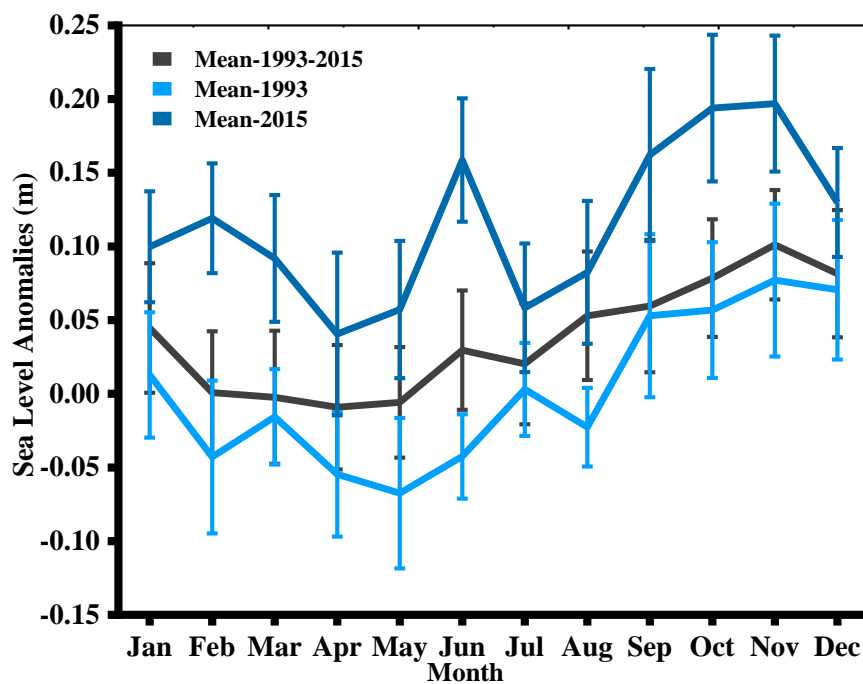
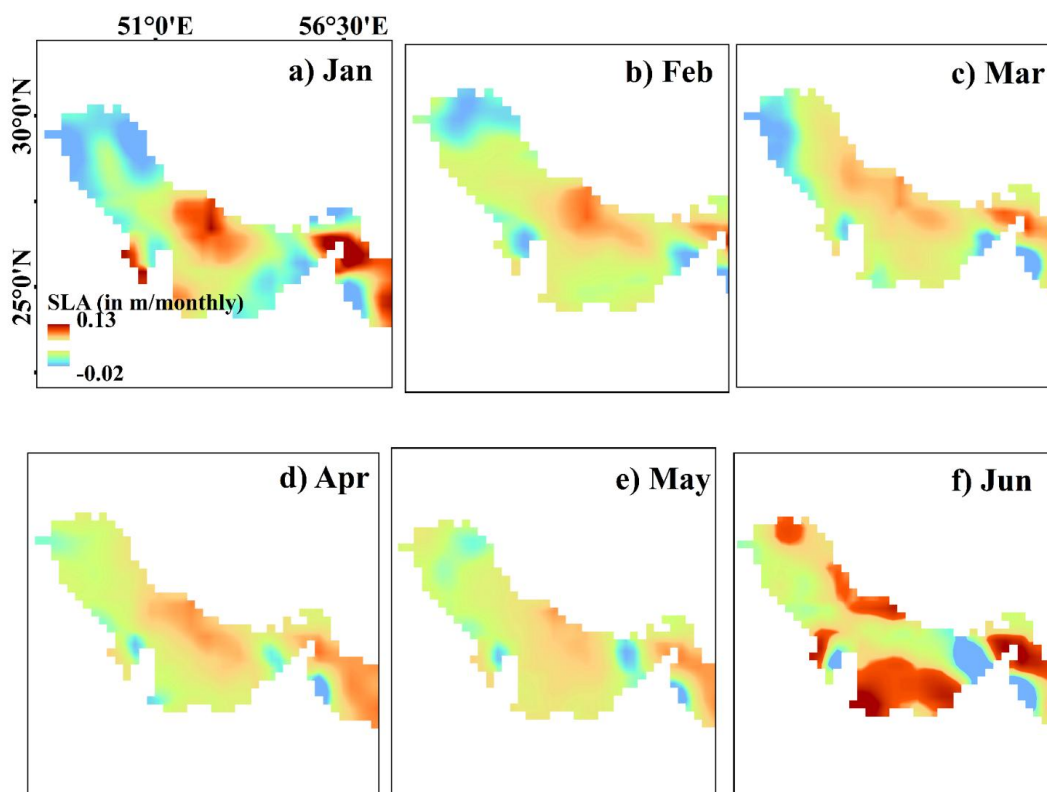


Fig. 8- Monthly mean sea level anomalies for the Persian Gulf in years 1993 and 2015 and the mean for 1993-2015 (in meters)

شکل ۸- ناهنجاری‌های ماهانه سطح خلیج فارس در سال ۱۹۹۳، ۲۰۱۵ و میانگین ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ (متر)



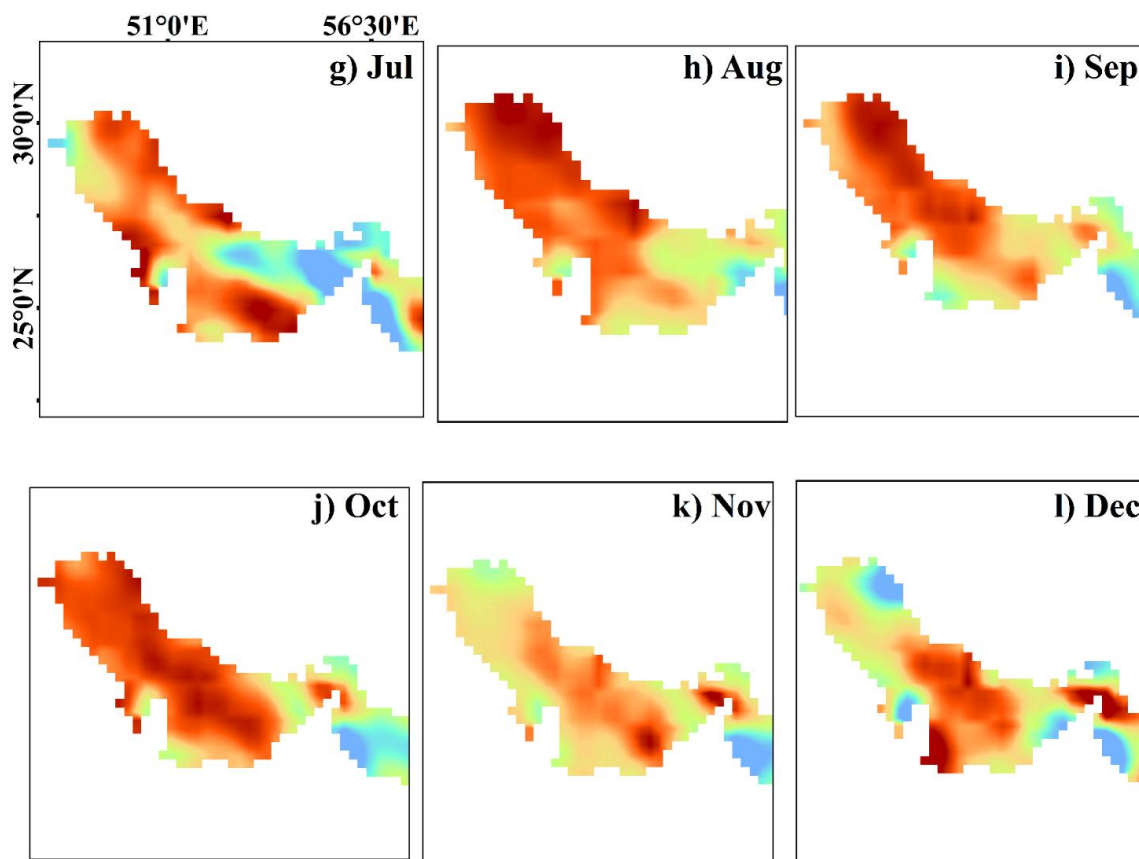


Fig. 9- Spatial patterns of monthly sea level anomalies for the Persian Gulf for the period of 1993-2015
 شکل ۹- الگوی مکانی ماهانه ناهنجاری‌های سطح خلیج فارس از ۱۹۹۳-۲۰۱۵

بیشترین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح در ماه آگوست و پایین‌ترین میزان دمای ماهانه را در سه ماه نخست سال نشان داد. دما سال ۲۰۲۰ نسبت به ۱۹۹۳ با $1/0.3^{\circ}\text{C}$ افزایش داشته است. این اختلاف دمایی در ماه ژانویه با $1/7^{\circ}\text{C}$ بیشترین افزایش دما را نسبت به ماه‌های دیگر داشته است (شکل ۱۰-ب).

نتایج الگوی شوری سطح دریا نشان داد بر خلاف دمای سطح دریا و دمای هوا ماه‌های سرد سال بیشترین میزان شوری در خلیج فارس رخ می‌دهد. در ماه‌های گرم سال بین می تا آگوست پایین‌ترین میزان شوری با متوسط 20 psu/month قرار دارد (شکل ۱۰-ج). متوسط شوری در سال ۱۹۹۳ نسبت به ۲۰۲۰ حدود 0.9 psu کاهش یافته است. این میزان در ماه‌های گرم سال (جولای و آگوست) با $1/0.4 \text{ psu}$ بیشترین تغییرات را نسبت به ماه‌های دیگر داشته است (شکل ۱۰-د).

۴-۵- تغییرات شوری، دمای سطح و دمای هوا از سطح ۲ متری در سطح خلیج فارس

متوسط الگوی تغییرات دمای سطح دریا، شوری سطح دریا و دمای ۲ متری از سطح دریا سطح در خلیج فارس بین سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. دمای سطح دریا در چهار ماهه نخست سال (ژانویه تا آوریل) با متوسط 21°C نسبت به ماه‌های دیگر پایین‌تر است. این مقدار در سال ۲۰۲۰ با $21/4^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۱۹۹۳ با $20/5^{\circ}\text{C}$ حاکی از افزایش $0/9^{\circ}\text{C}$ است. بیشترین افزایش دما در ماه‌های می، ژوئن و جولای رخ داده است (شکل ۱۰-ا). بالاترین دمای سطح دریا در خلیج فارس در ماه آگوست رخ می‌دهد، گرچه در سال ۱۹۹۳ ماه‌های آگوست و سپتامبر با متوسط 34°C بالاترین میزان دما را در طی یک سال داشته‌اند (شکل ۱۰-ا).

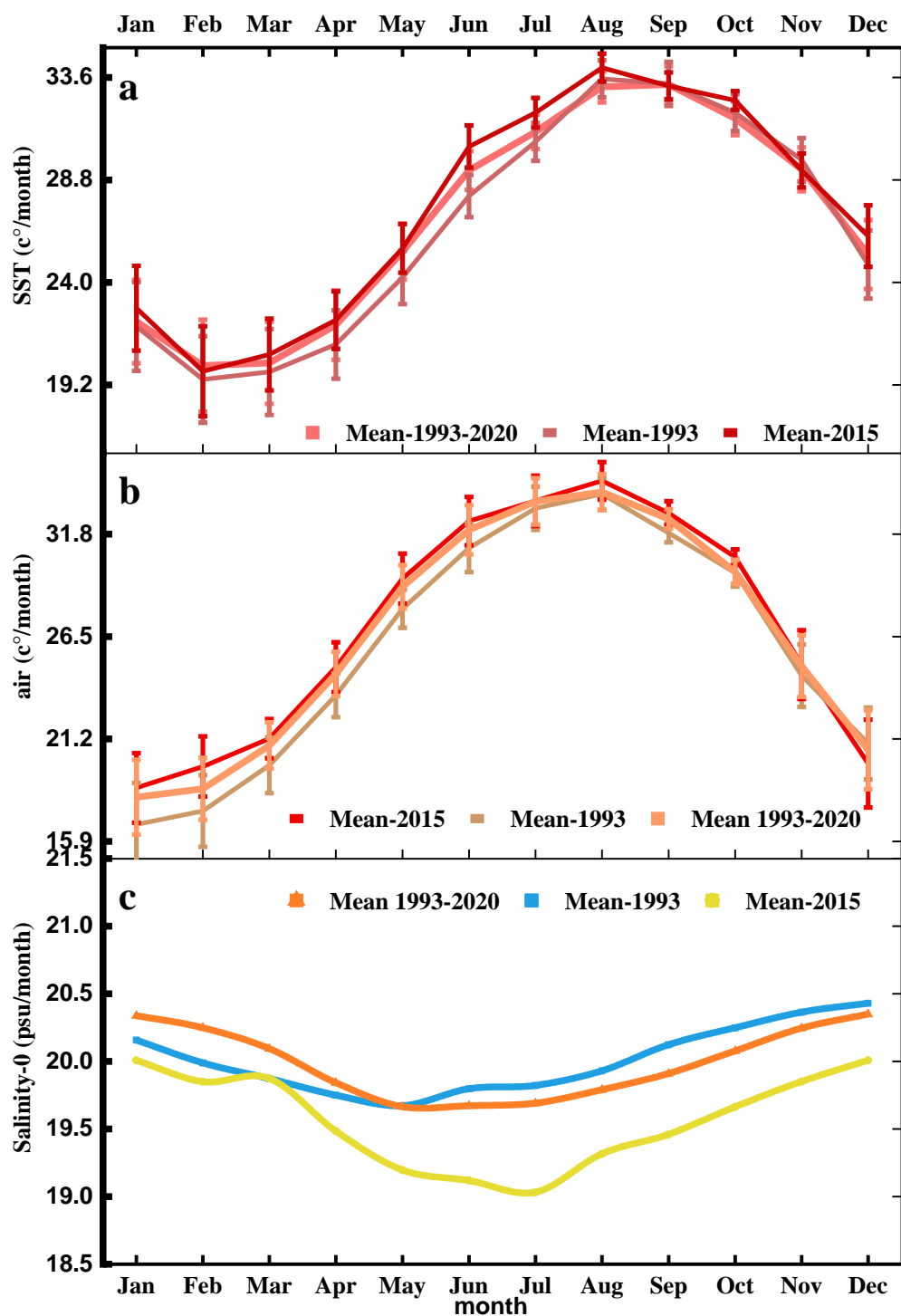
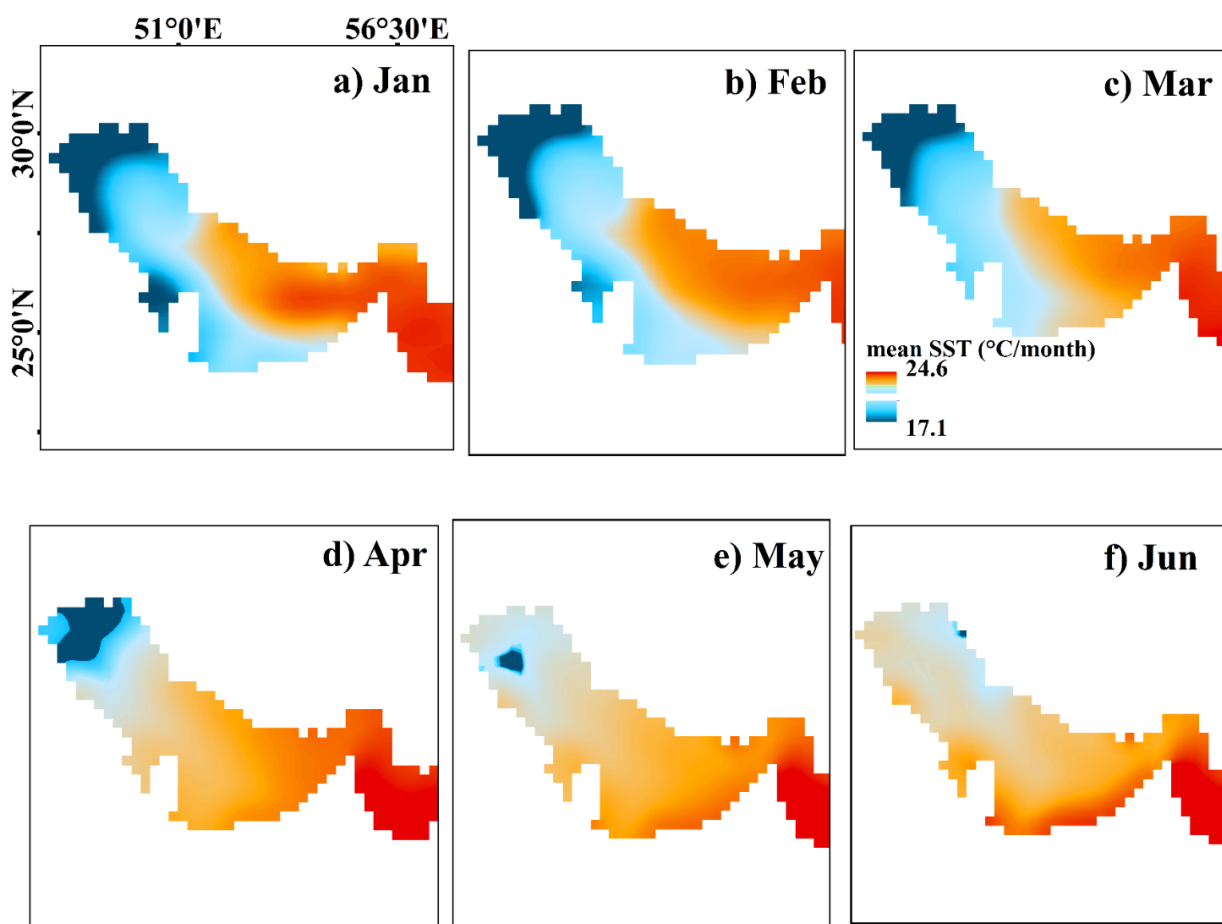


Fig. 10- Seasonal cycle of a) monthly SST, b) air 2m, and c) Salinity-0 for the Persian Gulf in 1993 and 2015 and the mean for 1993-2020

شکل ۱۰- چرخه فصلی دمای سطح دریا، (b) دمای هوا از سطح ۲ متری و شوری سطح دریا و (c) در خلیج فارس در سال‌های ۱۹۹۳، ۲۰۱۵ و میانگین زمانی ۱۹۹۳-۲۰۱۵

صورتی که این بخش از سواحل خلیج فارس در طی سه ماه ابتدای سال جزء بخش‌های با پایین‌ترین میزان دمایی در حوضه خلیج فارس به شمار می‌رود. همچنین، طی ماه‌های سپتامبر تا نوامبر در قسمت دریای عمان، دمای سطح دریا نسبت به بخش جنوب غرب سواحل حوضه خلیج فارس بسیار پایین‌تر است (شکل ۱۱-۱ تا ۱۱-۱۱). به صورت کلی، نتایج نشان می‌دهد نوسانات سطح آب دریا در خارج از خلیج فارس در شرایط افزایشی به تدریج از طریق تنگه هرمز به خلیج فارس راه می‌یابد و به سمت بخش‌های شمالی حرکت می‌کند. سپس از اواسط سپتامبر روند دما کاهشی است. این روند تغییرات از لحاظ مکانی در بیشتر ماه‌های سال از سمت نواحی شمالی به سمت تنگه هرمز گسترش می‌یابد (شکل ۱۱).

الگوی تغییرات مکانی متوسط دمای سطح خلیج فارس بین سال‌های ۱۹۹۳-۲۰۲۰ در شکل ۱۰ برای ماه‌های مختلف ارائه شده است. بالاترین میزان دمای سطح دریا در حوضه خلیج فارس در ماه آگوست مشاهده شد (شکل ۱۰-۱). نوار ساحلی در بخش شمالی خلیج فارس به نسبت بخش‌های میانی و جنوبی پایین‌ترین میزان دما (متوسط $^{\circ}\text{C}$ ۲۰) را دارند. این شرایط دمایی در طی ماه‌های مختلف سال تغییرات زیادی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱-۱ تا ۱۱-۱۱). طی ماه‌های ژانویه تا آوریل بخش‌های عمیق خلیج فارس در نوار ساحلی ایران تا دهانه تنگه هرمز بالاترین میزان دما بین $^{\circ}\text{C}$ ۲۲-۲۵ را دارند (شکل ۱۱-۱ تا ۱۱-۱۱). از ماه می این تغییرات دمایی به نوار ساحلی غربی (در سواحل امارات متحده عربی) تغییر پیدا می‌کند (شکل ۱۱-۱ تا ۱۱-۱۱). در



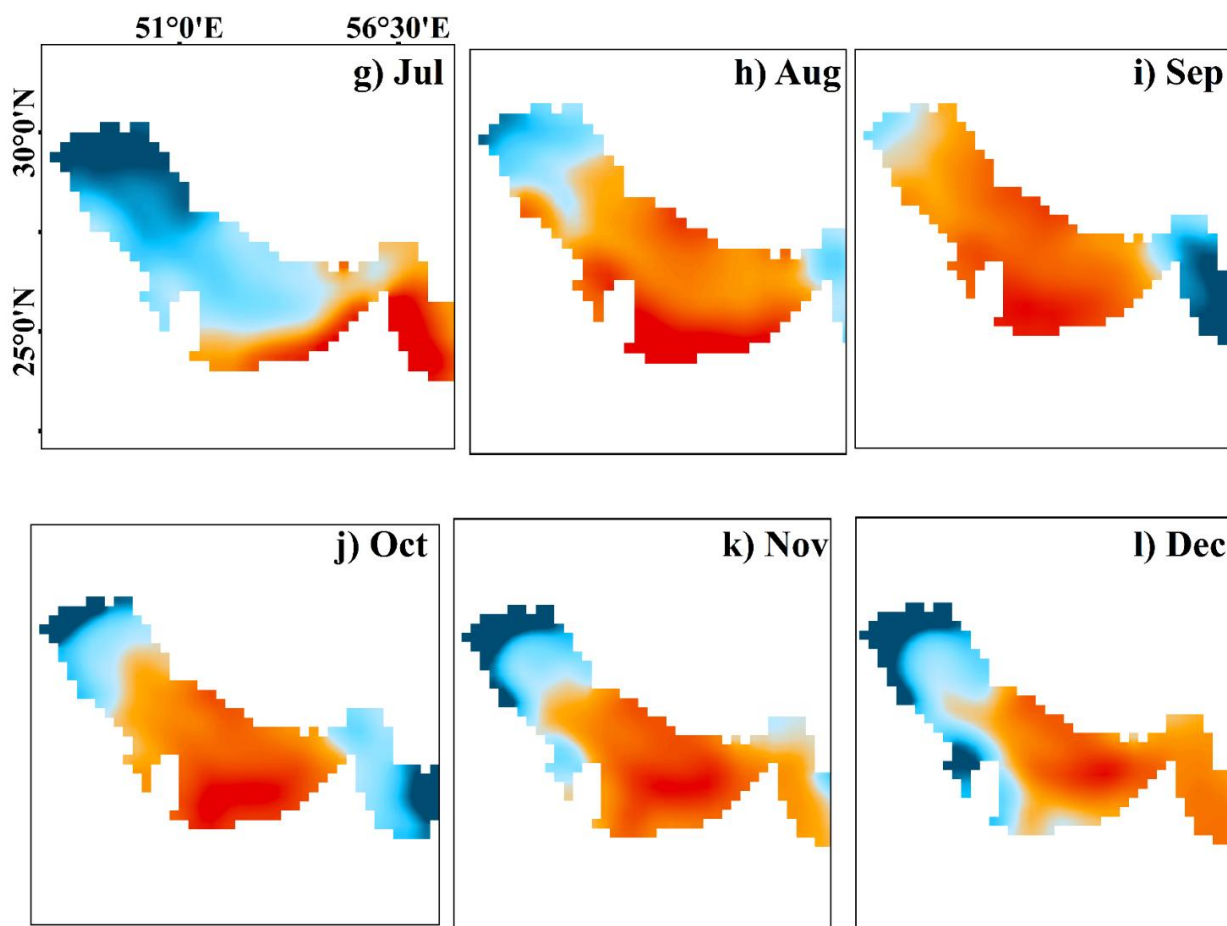


Fig. 11- Monthly spatial patterns of SST for the Persian Gulf for the period of 1993-2020

شکل ۱۱- الگوی مکانی ماهانه دمای سطح دریا در خلیج فارس از ۱۹۹۳-۲۰۲۰

دو جهت شرق و شمال نشان می‌دهد تنها بین دمای سطح دریا با ناهنجاری‌های سطح خلیج فارس رابطه معنی‌داری وجود دارد. مقادیر همبستگی بین ناهنجاری سطح دریا و دمای سطح دریا با 0.04 (p -value = 0.04) مشاهده شد. همچنین، بین دمای سطح دریا و دمای هوای 2 متری 0.09 (p -value = 0.000)، دمای هوای 2 متری از سطح و شوری سطح دریا 0.08 (p -value = 0.001) و بین سرعت باد در جهت‌های شرق و شمال در ارتفاع 10 متر از سطح زمین با 0.06 (p -value = 0.04) نیز رابطه معنی‌داری در مقیاس زمانی ماهانه وجود دارد (جدول ۳). تحلیل این همبستگی‌ها بین ناهنجاری‌های سطح دریا و پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد که به جز دمای سطح دریا، سایر پارامترها تأثیر مستقیم بر تغییرات ناهنجاری‌های سطح دریا در ماه‌های مختلف سال ندارند.

متوسط تغییرات ماهانه سرعت باد در جهت شرق در سال 2015 نسبت به 1993 حدود 0.4 ms^{-1} کاهش یافته است. بیشترین تغییرات افزایشی در ماه آوریل با 1.4 ms^{-1} و روند کاهشی در ماه‌های می و آگوست با 1.2 ms^{-1} رخ می‌دهد (شکل ۱۲-ا). این تغییرات برای سرعت باد در جهت شمال با میانگین سالانه حدود 0.3 ms^{-1} با بیشترین تغییرات افزایشی در ماه ژانویه، می و آگوست (حدود 1 ms^{-1}) و کاهش در ماه‌های آوریل و نوامبر (حدود 1 ms^{-1}) مشاهده شد (شکل ۱۲-ب).

روند ماهانه همبستگی بین ناهنجاری‌های سطح دریا با پارامترهای مورد بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل همبستگی بین ناهنجاری‌های سطح دریا با پارامترهای دمای سطح دریا، شوری سطح دریا، دمای هوای 2 متری، سرعت باد در

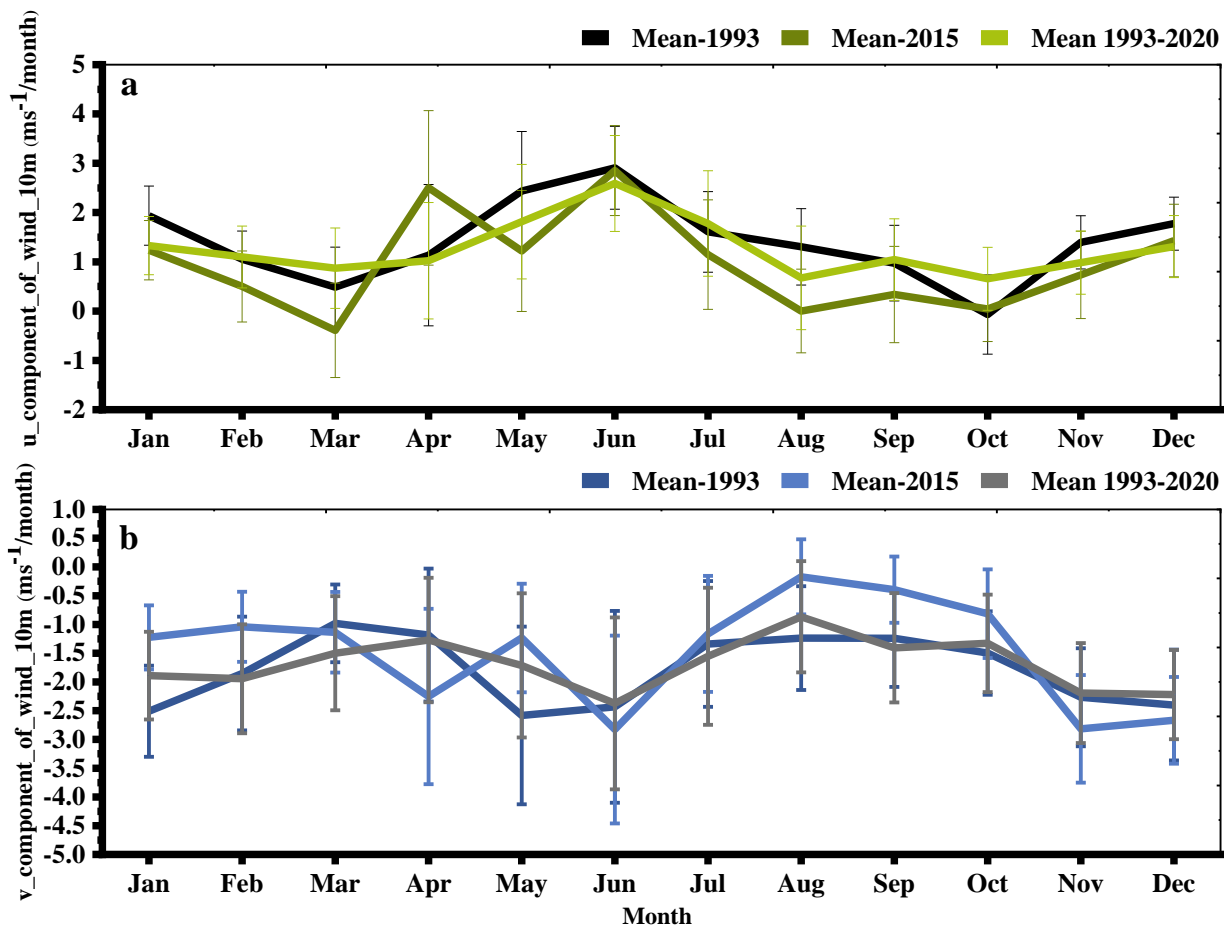


Fig. 12- Seasonal cycle of a) monthly 10m u-component of wind and, b) 10m v-component of wind for the Persian Gulf in 1993 and 2015 and the mean for 1993-2015

شکل ۱۲- (a) چرخه فصلی ماهانه سرعت جهت باد در جهت شرق و شمال از سطح ۱۰ متری (b) خلیج فارس در سال‌های ۱۹۹۳، ۲۰۱۵ و میانگین زمانی ۱۹۹۳-۲۰۱۵

Table 3- Significance of correlation between SST, air 2m, 10m v-wind, 10m u-wind, and salinity-0 with SLA on the monthly basis (Correlation coefficient at the confidence level of 95%).

جدول ۳- ضریب همبستگی بین پارامترهای دمای سطح دریا، دمای هوا در سطح ۲ متری، سرعت جهت باد به سمت شرق و شمال از سطح ۱۰ متری و شوری سطح دریا در دوره ماهانه با ناهنجاری‌های سطح دریا در دوره‌های ماهانه (ضریب همبستگی در سطح اطمینان ۹۵٪)

		SLA	SST	Salinity-0	Air 2m	10m v-wind	10m u-wind
SLA	Pearson Corr.	1					
	p-value	-					
SST	Pearson Corr.	0.6	1				
	p-value	0.04	-				
Salinity-0	Pearson Corr.	0.4	-0.4	1			
	p-value	0.2	0.2	-			
Air 2m	Pearson Corr.	0.1	0.9	-0.8	1		
	p-value	0.7	0.000	0.001	-		
10m v-wind	Pearson Corr.	-0.2	0.3	-0.4	0.4	1	
	p-value	0.5	0.4	0.3	0.2	-	
10m u-wind	Pearson Corr.	-0.3	0.01	-0.5	0.2	-0.6	1
	p-value	0.4	0.9	0.1	0.5	0.04	-

۵- بحث

اواخر سپتامبر به حداکثر میزان می‌رسد. این الگوی تغییرات با ناهنجاری‌های سطح دریا (شروع از ماه ژوئن و حداکثر تا اواسط نوامبر) قابل تطبیق است (شکل ۷).

روند بلندمدت مشاهده شده در مطالعات قبلی با $2/8 \text{ mm/yr}$ (Hosseini et al., 2007) $2/34 \text{ mm/yr}$ (Hosseini et al., 2007) و $2/34 \text{ mm/yr}$ (Hosseini et al., 2007) (Hassanzadeh et al., 2007) حاکمی از تغییرات مثبت در سطح خلیج فارس است. نتایج در این مطالعه که در یک دوره زمانی بلند مدت (۲۰۲۰-۱۹۹۳) صورت گرفت نیز حاکمی از تراز مثبت $3/9 \text{ mm/yr}$ (در داده‌های ارتفاع سنج ماهواره‌ای) است. این مقدار از تراز سطح جهانی دریاها ($3/04 \text{ mm/yr}$) حدود $0/1 \text{ mm/yr}$ بالاتر است. لازم به ذکر است که تغییرات ارتفاع سطح دریا در سال‌های اخیر با سرعت بیشتری بوده است که یکی از دلایل تغییرات نسبتاً کمتر در مطالعات قبلی می‌تواند به دلیل طول دوره مورد مطالعه باشد.

با توجه به مطالعات گذشته، تغییر دمای سطح دریا تابع تغییر دمای هوا است به طوری که با افزایش دمای هوا در فصول گرم، دمای آب نیز افزایش می‌یابد (Einali & Chegini, 2017). تغییرات دمای سطح دریا با $0/02 \text{ }^{\circ}\text{C/yr}$ و دمای هوا از سطح 2 متری حدود $0/024 \text{ }^{\circ}\text{C/yr}$ افزایشی است. نتایج هر دو پارامتر با همدیگر رابطه معنی‌دار مثبت ($p < 0.000$) در سطح اطمینان 95% نشان دادند. با این حال، سرعت روند افزایش دما در ارتفاع 2 متری بیشتر است. این افزایش دمای هوا در مطالعه‌ای (Sharif & Attarchi, 2022) که با استفاده از داده‌های زمینی (۲۰۲۰-۲۰۱۳) مورد بررسی قرار گرفت بین $0/03$ تا $0/1$ در سواحل شرقی خلیج فارس نیز مشاهده شد. همچنین این افزایش دما در حوضه خلیج فارس با مطالعات (Hosseini et al., 2021; Ramak et al., 2022) نیز مطابقت دارد. روند افزایش دما از سمت سواحل شمالی به تنگه هرمز کمتر است، اما الگوی مکانی دمای سطح دریا و دمای هوا از سمت بخش‌های شمالی خلیج فارس به تنگه هرمز افزایشی است (شکل ۴-۴ و ۴-۵).

برای شوری سطح دریا، شیب تغییرات با $0/03 \text{ psu/yr}$ - حاکمی از کاهش میزان شوری در سطح خلیج فارس است. در این دریای نیمه محصور، بیشترین تغییرات شوری از طریق تنگه هرمز صورت می‌گیرد (Lorenz et al., 2020)، از این رو، تغییرات میزان حجم ورودی آب از دریای عمان به خلیج فارس می‌تواند سبب افزایش و کاهش میزان شوری شود. آب سطحی اقیانوس هند که نسبت به آب سطحی دریای عمان شوری کمتری دارد (Einali & Chegini, 2017) از

افزایش میانگین جهانی دما در درجه اول ناشی از افزایش انبساط حرارتی اقیانوس‌ها، ذوب یخ‌های خشکی و تغییر ذخیره آب خشکی است (Cazenave et al., 2018). این الگوهای جغرافیایی تغییر سطح دریا ناشی از تأثیرگذاری فرآیندهای مختلف شامل تغییرات در چگالی آب دریا به دلیل تغییرات دما، شوری آب دریا و تغییر در گردش اقیانوس‌ها، تغییر شکل و تغییرات ژئوئیدی که می‌تواند ناشی از افزایش آب شدن یخ‌های قطبی باشد (Cazenave et al., 2018; Stammer et al., 2013)، همچنین، تغییرات جریان‌ات آب‌های زیرزمینی که از اقیانوس‌ها به سفره‌های زیرزمینی در خشکی‌ها و بلعکس جریان پیدا می‌کند، باشد (Stammer et al., 2013). این تغییرات ناهنجاری‌های سطح دریا در حوضه خلیج فارس با توجه به نیمه محصور بودن آن شرایط پیچیده‌تری نیز دارد. در این مطالعه، تغییرپذیری الگوهای پارامترهای تأثیرگذار بر تغییرات سطح آب خلیج فارس طی یک دوره زمانی ۲۷ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۳) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۵-۱- آنالیز روند پارامترها

نتایج مطالعات گذشته حاکمی از افزایش سطح آب خلیج فارس در فصل گرم سال و کاهش ناهنجاری‌ها در فصل سرد سال است (Michael & Reynolds, 1993). نتایج بدست آمده در این مطالعه نیز این تغییرات را به ترتیب در ماه نوامبر با حداکثر میزان و ماه آوریل با حداقل میزان ناهنجاری‌ها در خلیج فارس نشان داد. این روند تغییرات، متفاوت از الگوهای تغییرات دمایی سطح دریا و دمای هوا عمل می‌کند، که حداکثر میزان دما در ماه‌های گرم سال و حداقل میزان دما در ماه‌های سرد سال - احتمالاً ناشی از انبساط و انقباض دمای آب دریا - مشاهده می‌شود. در مطالعه (Hassanzadeh et al., 2007) نیز به تأثیرگذاری حداکثر انبساط در تابستان و حداکثر انقباض در زمستان در تغییرات ناهنجاری سطح خلیج فارس اشاره شده است.

تأثیر گرم شدن و انبساط حرارتی منجر به افزایش کلی سطح سالانه دریا می‌شود. در سطح جهانی، تغییر سطح آب دریا عمدتاً توسط اثر فضایی و تغییرات فشار اتمسفر انجام می‌شود (Emery, 1956; Lisitzin & Pattullo, 1961). منطقه خلیج فارس نیز با فشار بالا در زمستان و فشار کم در تابستان مشخص می‌شود که منجر به کاهش سطح آب دریا در مواقع کاهش دمای آب و بالا آمدن سطح آب دریا در زمان افزایش دمای آب دریا می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰-۱۰a و ۱۰-۱۰b نشان داده شده است، افزایش دمای سطح دریا و دمای ۲ متری از سطح در این منطقه از ژوئن رو به افزایش می‌گذارد و تا

قسمت‌های شمالی دریای عرب به داخل دریای عمان و از طریق این دریا وارد خلیج فارس می‌شود (Lorenz et al., 2020; Pous et al., 2015). ناهنجاری‌های دریای عمان روند فصلی دارد، به طوری که طبق مشاهدات بیشترین انتقال آب در فصل تابستان صورت می‌گیرد. از این رو، با افزایش میزان ورودی آب به خلیج فارس (در فصل گرم) از میزان شوری در این موقع سال کاسته می‌شود. الگوی تغییرات (کاهش شوری سطح دریا بین ماه‌های می تا اگوست) در شکل ۱۰- c نیز قابل مشاهده است. این تغییرات با چرخه ماهانه و فصلی ناهنجاری‌های سطح دریا رابطه معنی‌داری نیز نشان می‌دهد. در چرخه ماهانه، شوری سطح دریا با دمای هوای بیشترین همبستگی (۰/۸-) و رابطه معنی‌دار (p-value = 0.001) دارد. اما در روند بین سالانه، همبستگی پیرسون با ۰/۵- و ۰/۴- در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه معنی‌داری (p-value=0.02, 0.03) با داده‌های ارتفاع سنج و ناهنجاری سطح دریا دارند.

به طور کلی، در روندهای سالانه بیشترین همبستگی بین ناهنجاری‌های سطح دریا با شوری سطح دریا مشاهده شد که بین هر دو پارامتر رابطه معنی‌دار منفی وجود دارد (جدول ۲). این همبستگی با پارامترهای دیگر مشاهده نشد. از طرف دیگر، در الگوهای ماهانه رابطه معنی‌دار مثبت بین ناهنجاری‌های سطح دریا و دمای سطح دریا وجود دارد. لازم به ذکر است که عدم قطعیت در داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای امکان‌پذیر است (Prandi et al., 2021). با این حال، مطالعات بلندمدت با برآورد میانگین سالانه به طور قابل توجهی چنین خطاهایی را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، نتایج مطالعات اخیر می‌دهد که تخمین‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای قابل اعتماد و سازگار با مشاهدات زمین در خلیج فارس هستند.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر روی ناهنجاری‌های سطح خلیج فارس است. از این رو، روند تغییرات و الگوهای تغییرپذیری از سطح خلیج فارس در یک دوره زمانی ۲۷ ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای انجام این تحلیل‌ها از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای (۲۰۲۰-۱۹۹۳) و ناهنجاری‌های سطح دریا از محصول ۷2.0، از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ استفاده شد. الگوی تغییرات ماهانه سطح آب دریا در خلیج فارس تقریباً برعکس دمای سطح دریا و دمای هوا مشاهده شد، اما با روند تغییرات ماهانه شوری همسو است. تغییرات ناهنجاری‌های خلیج فارس بر اساس داده‌های جهانی ناهنجاری‌های سطح دریا برای دوره ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۵ 0.004 m/yr بود. اما در داده‌های ارتفاع سنج ماهواره‌ای در دوره ۲۰۲۰-۱۳۹۹ mm/yr $0.4 \pm 0.3/9$ برآورد شد. رابطه هر دو نوع داده (برای دوره زمانی که داده‌ها با همدیگر همپوشانی دارند) در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار (P-value = 0.000) است. گرچه روند ناهنجاری‌ها در سطح دریاها با گرم شدن کره زمین و افزایش سطح آب دریاها در ارتباط است، اما رابطه معنی‌داری در نتایج سالانه بین داده‌های آلتیمتری و دمای سطح دریا (در خلیج فارس) طی دوره زمانی مورد مطالعه مشاهده نشد. مقادیر ضرایب همبستگی بین شاخص‌های سطح دریا و تغییرات ناهنجاری خلیج فارس نسبتاً پایین است که نشان می‌دهد تأثیر احتمالی بر ارتفاع سطح دریا محدود است. بیشترین همبستگی در سطح معنی‌دار با شوری سطح دریا بود. از طرف دیگر، تغییرات متوسط چرخه ماهانه تفاوت معنی‌داری بین تغییرات ناهنجاری‌های سطح دریا با دمای سطح دریا نشان می‌دهد؛ اما بین این ناهنجاری‌ها با پارامترهای دیگر در مقیاس ماهانه رابطه معنی‌داری وجود ندارد. روند افزایش تغییرات

گردش جوی در سطح خلیج فارس عمدتاً توسط جریان ساحلی ایران^{۲۰} محدود می‌شود (Hunter, 1982). این گردش جوی از تنگه هرمز به سمت شمال غرب و با سرعتی بیش از 10 cm/s^{-1} جریان دارد (Reynolds, 1993). غالب این جریانات بادی در ناحیه خلیج فارس شامل بادهای شمال غربی هستند که در پشت جبهه‌های سرد متحرک جنوب شرقی رخ می‌دهند (Kamranzad, 2018; Reynolds, 1993). با این حال، الگوی باد غالب در مناطق مختلف خلیج فارس با تغییر جهت و موقعیت خط ساحلی، همچنین شرایط فصلی بادهای عوارض ساحلی (مانند کوه‌ها) تغییر می‌یابد (komijane et al., 2014). بالاترین میزان سرعت جهت باد در جهت شرق با ms^{-1}/yr $2/3$ در مرکز خلیج فارس به صورت گرداب مشاهده شد (شکل ۴-e). میزان شدت این نوع بادهای در مرکز خلیج فارس سبب بیشترین میزان انرژی بادی می‌شود که (Amirinia et al., 2017) در مطالعه خود به آن نیز اشاره کرده‌اند. این میزان در جهت شمال با ms^{-1}/yr $1/4$ در بخش تنگه هرمز بویژه سواحل شرقی (در سواحل ایران) است (شکل ۴-f). اما در روند کلی بلندمدت، تغییرات جریانات سرعت باد در جهت شمال روند افزایشی (ms^{-1}/yr $0/01$) و در جهت شرق روند کاهش‌ی (ms^{-1}/yr $-0/01$) بود. تغییرات الگوی بادی مشاهده شده با مطالعه (komijane et al., 2014) نیز مطابقت دارد. میزان شدت این تغییر الگو در هر دو جهت شرق و شمال در شکل ۴-f و ۴-e قابل مشاهده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Global Mean Sea Level (GMSL)
- 2- Ocean Heat Content (OHC)
- 3- El Nino-Southern Oscillation (ENSO)
- 4- Earth Observations (EO)
- 5- Reanalysis
- 6- U-Component of Wind
- 7- V-Component of Wind
- 8- Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)
- 9- Sea Surface Temperature (SST)
- 10- National Oceanographic Data Committee (NODC)
- 11- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
- 12- Sea Level Rise
- 13- Sea Level Anomalies
- 14- Copernicus Climate Change Service
- 15- National Centre of Space Research (CNES)
- 16- European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)
- 17- Google Earth Engine
- 18- Sea level anomalies (SLA)
- 19- Sea Surface Temperature (SST)
- 20- Iranian Coastal Current
- 21- Advanced Very-High-Resolution Radiometer (AVHRR)
- 22- Sea Surface Salinity (SSS)

دمایی در سطح حوضه خلیج فارس ($0/02^{\circ}\text{C}/\text{yr}$)، احتمال افزایش این تغییرات را در بلندمدت گوشزد می‌کند که می‌تواند سبب آسیب‌های جبران ناپذیری به مناطق ساحلی شود.

با توجه به روند افزایشی ارتفاع سطح آب خلیج فارس و همچنین دریاهای جهان، پیشنهاد می‌شود در برنامه‌های آینده قبل از موقعیت‌یابی برای احداث زیرساخت‌های صنایع، گمرک و اسکله‌های دریایی در نواحی جنوبی ایران، تغییرات ارتفاعی سطح آب مورد توجه قرار گیرد.

از آنجایی که پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق در سطح آب دریاها (در خلیج فارس) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، برای شناخت جامع پارامترهای تأثیرگذار در ناهنجاری‌های سطح آب دریاها، لایه‌های ارتفاعی مختلف هر پارامتر (شوری، دمای آب، فشار اتمسفری) نیز بررسی شود. همچنین مطالعه تغییرات کف دریاها که می‌تواند در اثر تغییرات تکتونیکی صفحات زمینی ایجاد شود، از پارامترهای تأثیرگذار در این ناهنجاری‌ها است که نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر دارد. این کار سبب دست یافتن به اطلاعات جامع‌تری از چگونگی تغییرات ارتفاع سطح آب دریا خواهد شد.

در دسترس نبودن داده‌های زمینی برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج از جمله چالش‌های این تحقیق بوده است. برای کاهش این چالش‌ها، سازمان‌ها و یا نهادهای متولی می‌توانند با افزایش ایستگاه‌های برداشت زمینی و همچنین تبدیل داده‌ها به فرمت تصویر، کمک مهمی در این زمینه داشته باشند. چنین طرح‌هایی در سازمان‌های زمین‌شناسی آمریکا و سازمان‌های هواشناسی و فضایی اروپا صورت گرفته و داده‌های شبکه‌ای در فرمت‌های مختلف تصویری فراهم شده است. با فراهم آوردن چنین داده‌هایی در آینده می‌توان پیش‌بینی‌های ارزشمندی بر اساس الگوهای تغییرات پدیده‌های مربوط به سطح زمین انجام داد.

۷- مراجع

- Abdulla C P & Al-Subhi A M (2021) Is the Red Sea sea-level rising at a faster rate than the global average? An analysis based on satellite altimetry data. *Remote Sensing* 13(17):3489
- Amirinia G, Mafi S, & Mazaheri S (2017) Offshore wind resource assessment of Persian Gulf using uncertainty analysis and GIS. *Renewable Energy* 113:915-929
- Cazenave A, Palanisamy H, & Ablain M (2018) Contemporary sea level changes from satellite altimetry: What have we learned? What are the new challenges? *Advances in Space Research* 62(7):1639-1653
- Cheng L, Abraham J, Hausfather Z, & Trenberth K E (2019) How fast are the oceans warming? *Science* 363(6423):128-129
- Church J A, & White, N J (2011) Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*. 32(4-5): 585-602
- Eberly LE (2007) Correlation and simple linear regression. *Methods Mol. Biol* 404: 143-164
- Einali A & Chegini V (2017) Study of temporal and spatial variations of physical parameters (temperature, salinity and density) trend of the Pozm Bay. *Journal of Marine Science and Technology* 16(3):111-124
- Ghorbanian A, Kakooei M, Amani M, Mahdavi S, Mohammadzadeh A, & Hasanlou M (2020) Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 167:276-288
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, & Moore R (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202:18-27
- Hamlington B D, Cheon S H, Piecuch C G, Karnauskas K B, Thompson P R, Kim K -Y, Reager J T, Landerer F W, & Frederikse T (2019) The dominant global modes of recent internal sea level variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124(4):2750-2768
- Hamlington Benjamin D, Fasullo J T, Nerem R S, Kim K, & Landerer F W (2019) Uncovering the pattern of forced sea level rise in the satellite altimeter record. *Geophysical Research Letters* 46(9):4844-4853
- Hamlington Benjamin D, Piecuch C G, Reager J T, Chandanpurkar H, Frederikse T, Nerem R S, Fasullo J T, & Cheon S-H (2020) Origin of interannual variability in global mean sea level. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(25):13983-13990
- Hassanzadeh S, Kiasatpour A, & Hosseinibalam F (2007) Sea-level response to atmospheric forcing along the north coast of Persian Gulf. *Meteorology and Atmospheric Physics* 95(3-4):223-237
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, Thépaut J (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730):1999-2049
- Horton B P, Kopp R E, Garner A J, Hay C C, Khan N S, Roy K, & Shaw T A (2018) Mapping sea-level change in time, space, and probability. *Annual Review of Environment and Resources* 43(1):481-521
- Hosseini S A R, Gholami H, Esmailpoor Y, & Cerda A (2021) Effect of the climatic parameters on the trend of vegetative land cover changes with land degradation approach in the Persian Gulf and Oman Sea Watershed. *Watershed Management Research Journal* 34(3):74-94
- Hosseinibalam F, Hassanzadeh S, & Kiasatpour A (2007) Interannual variability and seasonal contribution of thermal expansion to sea level in the Persian Gulf. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 54(9):1474-1485
- Hunter J R (1982) The physical oceanography of the Arabian Gulf: A review and theoretical interpretation of previous observations. *The First Arabian Gulf Conference on Environment and Pollution*. Kuwait University, Faculty of Science, Kuwait, 1-23
- Emery K O (1956) Sediments and water of Persian Gulf. *AAPG Bulletin* 40:2354-2383
- Kamranzad B (2018) Persian Gulf zone classification based on the wind and wave climate variability. *Ocean Engineering* 169:604-635
- Komijane F, Nazari A, Shahrzad N, Shahrzad N (2014) The Persian Gulf wind analysis using meteorological synoptic stations data. *Nivar* 38(85-84):27-44
- Kuo Y, Lo M, Liang Y, Tseng Y, & Hsu C (2021) Terrestrial water storage anomalies emphasize interannual variations in global mean sea level during 1997-1998 and 2015-2016 El Niño Events. *Geophysical Research Letters* 48(18)

- Legeais J-F, Ablain M, Zawadzki L, Zuo H, Johannessen J A, Scharffenberg M G, Fenoglio-Marc L, Fernandes M J, Andersen O B, Rudenko S, Cipollini P, Quartly G D, Passaro M, Cazenave A, & Benveniste J (2018) An improved and homogeneous altimeter sea level record from the ESA Climate Change Initiative. *Earth System Science Data* 10(1):281–301
- Lisitzin E, & Pattullo J G (1961) The principal factors influencing the seasonal oscillation of sea level. *Journal of Geophysical Research* 66(3):845–852
- López García M J (2020) SST comparison of AVHRR and MODIS time series in the western Mediterranean Sea. *Remote Sensing* 12(14):2241
- Lorenz M, Klingbeil K, & Burchard H (2020) Numerical study of the exchange flow of the Persian Gulf using an extended total exchange flow analysis framework. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125(2):e2019JC015527
- Melet A, Teatini P, Le Cozannet G, Jamet C, Conversi A, Benveniste J, & Almar R (2020) Earth observations for monitoring marine coastal hazards and their drivers. *Surveys in Geophysics* 41(6):1489–1534
- Michael Reynolds R (1993) Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman-Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin* 27:35–59
- Nogueira M, Boussetta S, Balsamo G, Albergel C, Trigo I F, Johannsen F, Miralles D G, & Dutra E (2021) Upgrading land-cover and vegetation seasonality in the ECMWF coupled system: Verification with FLUXNET sites, METEOSAT satellite land surface temperatures, and ERA5 atmospheric reanalysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126(15)
- Pous S, Lazure P, & Carton X (2015) A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. *Continental Shelf Research* 94:55–70
- Prandi P, Meyssignac B, Ablain M, Spada G, Ribes A, & Benveniste J (2021) Local sea level trends, accelerations and uncertainties over 1993–2019. *Scientific Data* 8(1)
- Ramak H, Soyufjahromi M, & Akbari P (2022) Persian Gulf Water mass tracking by surface temperature and salinity properties TT. *Journal of Oceanography* 12(48):13–28 (In Persian)
- Reynolds R M (1993) Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman-Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin* 27:35–59
- Sharif M, & Attarchi S (2022) Investigation the effect of environmental parameters on mangrove ecosystems using satellite images. *Nivar* 45(114–115):99–110 (In Persian)
- Small C & Nicholls R J (2003) A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research* 19(3):584–599
- Stammer D, Cazenave A, Ponte R M, & Tamisiea M E (2013) Causes for contemporary regional sea level changes. *Annual Review of Marine Science* 5(1):21–46
- Vieira F, Cavalcante G, & Campos E (2020) Analysis of wave climate and trends in a semi-enclosed basin (Persian Gulf) using a validated SWAN model. *Ocean Engineering* 196:106821
- Watson C S, White N J, Church J A, King M A, Burgette R J, & Legresy B (2015) Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era. *Nature Climate Change* 5(6):565–568