



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



تغییرات فصلی آنومالی تراز دریا در خلیج فارس (۱۳۷۱-۱۳۹۶)

مریم سیوفچه‌رمی*، زهره شاه منصوری

گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

* نویسنده مسؤل، پست الکترونیک: soyufjahromi@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2021.197166.2303

چکیده

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های بلندمدت AVISO، طی ۲۵ سال (۱۱ دی‌ماه ۱۳۷۱ الی ۱۰ دی‌ماه ۱۳۹۶)، آنومالی تراز دریای خلیج فارس (قدرت تفکیک فضایی ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی)، در محیط نرم‌افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است. متوسط ۲۵ ساله از داده‌ها نشان می‌دهد؛ آنومالی تراز دریا مثبت و برابر با $3/06 \pm 0/05$ cm (انحراف معیار \pm میانگین) است که بیشتر از متوسط جهانی است. دامنه تغییرات آن از مقدار کمینه $2/46$ cm تا بیشینه $3/42$ cm تغییر می‌کند. متوسط ۲۵ ساله از هر فصل نشان می‌دهد که آنومالی تراز دریا با خیزی در فصل پاییز و افتی در فصل بهار مواجه است. دو فصل تابستان و زمستان به صورت فصل گذار از بیشینه آنومالی پاییزه به کمینه آنومالی بهاره است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که توزیع مکانی آنومالی تراز دریا در حوضه، متفاوت است. میانگین آنومالی روند تراز دریا در خلیج فارس افزایشی و برابر با $2/9 \pm 0/1$ mm/year است که خلیج فارس را عملاً به سه بخش شمال غربی در نزدیکی ساحل عربی (با آهنگ کمتر از $2/5$ mm/year)، بخش شمالی و مرکزی خلیج (با آهنگ $2/3-0/5$ mm/year) و بخش جنوبی خلیج و تنگه هرمز (با آهنگ بیش از $3/5$ mm/year) تقسیم می‌کند. پس بنابراین، اگرچه سر خلیج فارس دارای روند تغییرات مثبت است، اما کمتر از بخش جنوبی آن و در نزدیکی تنگه هرمز است. اگر افزایش تراز دریای خلیج فارس، با همین روند ادامه یابد، در ۲۰۰ سال آینده، بیش از $0/5$ m سطح تراز دریای خلیج فارس افزایش خواهد داشت که در حجم حوضه و مساحت آن تغییرات قابل توجهی وارد می‌شود.

واژگان کلیدی: آنومالی سطح تراز دریا، تغییرات فصلی، دستگاه داده AVISO، SSALTO/DUACS، MATLAB

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

در مقیاس جهانی، سطح تراز دریا (Sea level) تغییر می‌کند و دامنه نوسانات آن، نتیجه‌ای از تغییر حجم آب اقیانوس یا تغییر حجم حوضه اقیانوسی است (Miller et al., 2005). در مقیاس جهانی، این تغییر حجم به عواملی بستگی دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این عوامل شامل تغییر در رشد یا کاهش ورق‌های یخ قاره‌ای (دامنه نوسانات ۲۰۰ m در هر ۱۰ky = هزار سال) است (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993; Dangendorf et al., 2019; Frederikse et al., 2020; Slater et al., 2020) که به عنوان مهم‌ترین عامل در تغییر سطح تراز اقیانوس است (Radić and Hock, 2011). همچنین، انبساط و انقباض گرمایی آب دریا (دامنه نوسانات کمتر از ۱۰ m در هر ۱۰ky)، آب‌های زیرزمینی و دریاچه‌ها (دامنه نوسانات کمتر از ۵ m در هر ۱۰ky)، جابه‌جایی کف اقیانوس (صفحه اقیانوسی) (Gregory et al., 2019) یا در طول پشته‌های میان‌اقیانوسی (دامنه نوسانات بیش از ۱۰۰ m در هر ۱۰۰my = میلیون سال)، نرخ رسوب‌گذاری (دامنه نوسانات کمتر از ۵۰m در حدود ۱۰۰ my)، فرونشست قاره‌ای (دامنه نوسانات کمتر از ۱۰ m در حدود ۱۰۰ my) نیز در تغییر سطح تراز دریا موثرند. طبق شکل ۱، جابجایی فلات اقیانوسی باعث افزایش نسبتاً سریع سطح تراز دریا می‌شود؛ اما کاهش سطح تراز آهسته‌تر از افزایش آن است. زیرا فرورفتن فلات اقیانوسی که به کاهش سطح تراز دریا منجر می‌شود، به دلیل فرونشست گرمایی (Thermal subsidence) آهنگ کندتری دارد (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993). همه این شش عامل، در بررسی سطح تراز در مقیاس منطقه‌ای، می‌تواند

دخیل نباشد و آنومالی (عموماً آنومالی به اختلاف نسبت به حالت نرمال اطلاق می‌شود) (Cambridge Dictionary, 2008) سطح تراز از یک منطقه، به منطقه‌ای دیگر متفاوت باشد. در مقیاس منطقه‌ای، تنش باد و شار گرمایی (Heat flux) سطحی نقش تعیین‌کننده دارند (Gill, 1982). تغییراتی که به محتوای گرمایی (Heat content) سطوح بالایی اقیانوس برمی‌گردد (Dangendorf et al., 2019)، می‌تواند بر مشخصه‌های محلی آنومالی تراز دریا به صورت جدی تاثیرگذار باشد (Timmermann et al., 2010). شار گرمایی سطحی بر ترمودینامیک لایه‌های سطحی دریا اثر نموده و تا حدی، تغییرات تراز دریا را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. میزان اثرپذیری سطح تراز دریا از شار گرمایی سطحی در حوضه‌های مختلف اقیانوسی متفاوت است (Bouttes et al., 2014; Gera et al., 2016; Ruiz et al., 2016). به علاوه، آنومالی تنش باد سبب تغییر در همگرایی (Convergence) انتقال اکمن نزدیک به سطح (Near-surface Ekman transport) می‌شود. با توجه به جهت سرعت پمپاژ اکمن (Ekman pumping velocity)، آب‌های سرد به سمت سطح اقیانوس مکیده می‌شود که سبب کاهش عمق ترموکلاین و کاهش محلی تراز دریا خواهد شد و برعکس آب‌های گرم به سمت کف اقیانوس مکیده می‌شود که سبب افزایش عمق ترموکلاین و افزایش محلی تراز دریا خواهد شد (Tomczak and Godfrey, 2013). تغییر در ویژگی‌های جوی و اقیانوسی نیز بر آنومالی‌های تراز دریا به صورت محلی و در مقیاس منطقه‌ای اثرات زمانی و مکانی دارد (Subbotina et al., 2001; Landerer et al., 2007).

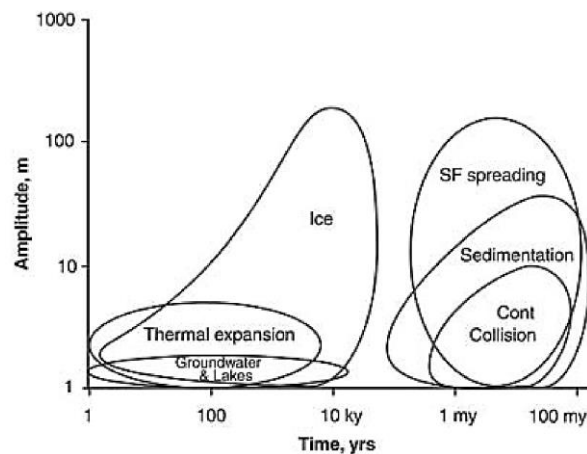


Fig. 1- Processes affecting the range of oceanic level fluctuations with respect to time intervals (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993). SF= Sea-floor, Cont= Continental.

شکل ۱- فرایندهای موثر بر دامنه نوسانات سطح تراز اقیانوسی با توجه به بازه‌ی زمانی (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993). SF= کف اقیانوس (Sea-floor)، Cont= قاره‌ای (Continental)

الگوی منظم نوسان سطح آب در آب‌های آزاد، جزرومدی است (Afshar-Kaveh et al., 2018). تغییرات سطح تراز دریا در خلیج فارس، نیز عموماً جزرومدی (Purser, 2012) است، لذا مطالعه تراز دریا نیز عموماً به صورت داده‌های ایستگاه‌های جزرومدی ساحلی است. طبق تحلیل ماهیانه‌ی داده‌های ۱۱ ساله (1980-1990) از تراز دریا در نزدیکی ساحل جنوبی خلیج فارس، از دو ایستگاه جزرومدی Rastanura و Safaniya در کشور عربستان، بیشینه تراز دریا، در تابستان (به ترتیب ۴۴۶ cm و ۴۳۰ cm) و کمینه آن در زمستان (به ترتیب ۳۹۷ cm و ۳۷۸ cm) اتفاق می‌افتاد. متوسط گستره افت و خیز تراز دریا در ایستگاه‌های جزرومدی، ۲۶ cm برآورد شده است (Sultan et al., 1995).

همچنین، پاسخ تراز دریای خلیج فارس به نیروهای جوی با استفاده از داده‌های ۱۰ ساله (1990-1999) ناشی از ارتفاع جزرومد، فشار هوا، دمای هوا و سرعت باد در دو ایستگاه بندرعباس و بوشهر بررسی شده است و نشان داده شده است که متوسط سالیانه سطح تراز دریا در ایستگاه بندرعباس نسبت به بوشهر حدود ۶ cm کمتر است در حالی که دامنه جزرومد بندرعباس بیشتر از بوشهر است (Hassanzadeh et al., 2007). داده‌های ۱۱ ساله (1990-2000) از ۱۱ ایستگاه آب‌نگاری و جزرومدی در نواحی ساحلی شمالی و جنوبی خلیج فارس (شامل ایستگاه‌های: Imam Hassan، Juaymah، Bushehr، Shahid، Abu Ali pier، Kangan، Marjan، Tanura، Zuluf، Tanajib pier و Safaniah) نیز نشان داده است که تراز دریای خلیج فارس در حال افزایش است و نرخ این افزایش، به‌طور میانگین برابر با ۲/۳۴ mm در هر سال در ایستگاه‌های ساحلی است (Hosseinibalam et al., 2007).

ایستگاه آب‌نگاری و جزرومدی در مطالعه Hosseinibalam et al. (2007) به‌طور مشابه، در بخش

مطالعات متعددی مانند: Gornitz (1995)، Church et al. (2001) و Antonov et al. (2005)، بیانگر افزایش تراز دریای جهانی در قرن بیستم است که شاخصی برای ارزیابی تغییرات آب‌وهوایی در بازه‌های زمانی متفاوت به ویژه روندهای بلندمدت (Long-term Trend) است (Bindoff et al., 2007). این تغییرات در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند نتایج متفاوتی در مقایسه با مقیاس جهانی داشته باشد. به عنوان مثال در مقیاس منطقه‌ای، سطح تراز قطب شمال (Walsh et al., 1996) و جنوب اقیانوس آرام (Timmermann et al., 2010) برخلاف افزایش سطح تراز جهانی دریا، در حال کاهش است. اگرچه از نظر مقیاس منطقه‌ای و یا محلی، مطالعاتی در خلیج فارس وجود دارد (Emami et al., 2019; Salarijazi, 2019) اما به‌طور خاص، سطح تراز خلیج فارس (۳۱-۲۴°N، ۴۸-۵۶°E)، در مطالعات کمی مورد بررسی قرار گرفته است. این خلیج، حوضه‌ای کم‌عمق (میانگین عمق: ۳۶ m) است که با تنگه هرمز از دریای عمان جدا می‌شود (Reynolds, 1993). آب دریای عمان از شمال تنگه هرمز وارد خلیج می‌شود و پس از دور زدن خلیج، از نیمه جنوبی تنگه، با جریان‌های زیرسطحی (Thoppil and Hogan, 2010a) خارج می‌شود (شکل ۲: Reynolds, 1993). در طول سال، باد شمال (Shamal wind) در اکثر مواقع از سمت غرب و شمال غربی (بر خلیج فارس می‌وزد و بر دینامیک آن تاثیر می‌گذارد) (Thoppil and Hogan, 2010b) به علاوه، قرارگیری این حوضه در نزدیکی عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و تبخیر شدید باعث شده است که از نظر میزان شار گرمای خالص قابل توجه باشد (Xue and Eltahir, 2015). همچنین وجود رودخانه‌هایی مانند اروندرود با قابلیت کشتی‌رانی (Reynolds, 1993) و تغییرات زیاد جزرومد (بیش از ۱ m Purser, 2012) باعث شده که نسبت به سایر حوضه‌های نیم‌بسته جهان، منحصر به فرد باشد (Reynolds, 1993) و در نتیجه بررسی سطح تراز آن مهم گردد.

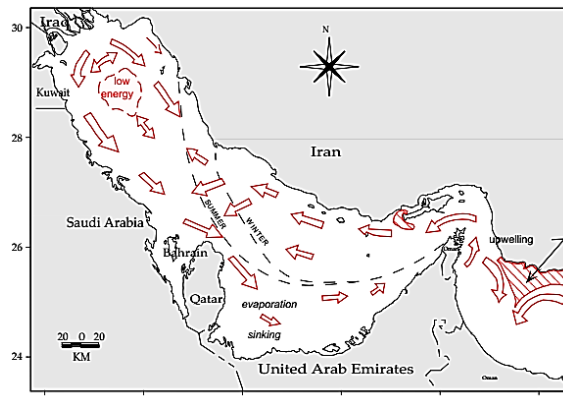


Fig. 2- A scheme of the flow circulation in the Persian Gulf (Reynolds, 1993)

شکل ۲- طرح‌واره‌ای از گردش جریان در خلیج فارس (Reynolds, 1993).

دریا (Sea Level Anomaly) را برحسب متر (با دقت 0.1 mm) ارائه می‌کند. آنومالی تراز دریا (با علامت اختصار SLA، بیانگر اختلاف ارتفاع نسبت به سطح متوسط دریا (Mean Sea Level) با علامت اختصار MSL، به عنوان سطح مرجع است. براساس راهنمای داده AVISO، سطح متوسط دریا به متوسط دوره زمانی بین سال 1993 الی 2012 در مقیاس جهانی ارجاع داده می‌شود (AVISO+, 2018). از این‌رو، ابتدا از داده‌های میانگین روزانه‌ی آنومالی سطح تراز دریا (تعداد داده: ۹۱۳۱ روز)، در هر سلول، به صورت فضایی متوسط گرفته شد. این متوسط، به عنوان متوسط ۲۵-ساله از آنومالی تراز دریا در آن سلول محسوب می‌شد. سپس، داده‌های روزانه این ۲۵ سال به فصل‌های جداگانه (جمعا ۱۰۰ فصل) تقسیم شد و چهار متوسط فصلی جداگانه، به عنوان متوسط فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان، برای این ۲۵ سال داده تهیه شد. طریقه ساختن فصل‌ها نیز باتوجه به روزهای مربوط به هر ماه طبق جدول ۱ بود. از آنجایی که در این داده‌ها، شش سال (1996، 2000، 2004، 2008، 2012، 2016) کبیسه بود، لذا در سال کبیسه یک روز بیشتر از سال معمولی در تهیه فصل زمستان دخالت داشت. زیرا فصل زمستان حاصل سه ماه میلادی December، January و February است، و در سال کبیسه، ماه February، به جای ۲۸ روز، ۲۹ روز است. تعداد روزهای مورد استفاده در محاسبه ساخت داده فصلی در جدول ۳ آورده شده است.

لازم به ذکر است که این عملیات در هر سلول $25^{\circ}N \times 0.25^{\circ}E$ از خلیج فارس انجام شد تا تحلیل فضایی آنومالی تراز دریا در کل حوضه خلیج فارس میسر شود. همچنین نسبت به کل حوضه، میانگین، انحراف معیار (با علامت اختصار Standard Deviation:SD)، بیشینه، کمینه و دامنه تغییرات محاسبه شد تا اطلاعات آماری اولیه‌ای از حوضه در هر فصل به دست آید. پس از میانگین‌گیری، تحلیل روند (Trend Analysis) تراز دریا از نظر فضایی نیز انجام شد. به این صورت که برای هر سلول داده خلیج فارس، یک تابعی خطی به صورت $SLA=at+b$ در طی زمان به آن سلول برازش داده شد. با توجه به این که اگر علامت شیب خط a مثبت (منفی) باشد، افزایش (کاهش) آنومالی تراز دریا را در آن سلول، طی زمان نشان می‌دهد؛ لذا بررسی علامت شیب به عنوان آهنگ افزایش یا کاهش آنومالی تراز دریا مورد اهمیت قرار گرفت. از آنجایی که بازه داده AVISO، نسبت به مطالعات اندازه‌گیری گذشته در این منطقه (Sultan et al., 1995; Hassanzadeh et al., 2007; Hosseinibalam et al., 2007) طولانی‌مدت (۲۵ سال) است، لذا می‌توان با بسط داده‌ها، به سمت آینده، تغییرات داده‌ها را برای آینده (۲۰۰ سال) نیز پیش‌بینی نمود.

شمال غرب خلیج فارس، با استفاده از داده‌های ۲۸ ساله (1979-2007) از ۱۵ ایستگاه جزرومدی (شامل ایستگاه‌های: Kangan, Safaniyah, Lawhah, Marjan, Zuluf, Imam Hassan, Abu Ali, Tanajib, Arabiyah Island, Safaniyah Pier, Quarayyah و Mina Salman, Ras Tanurah, Abu Safah Pier) نشان داده شده است که سطح تراز خلیج فارس به صورت صعودی و به طور میانگین 0.5 ± 0.2 mm/year (SD \pm میانگین) در هر سال، در حال افزایش است (Alothman et al., 2014).

این مطالعات به خوبی نشان می‌دهد که اصلی‌ترین چالش در مطالعه سطح تراز دریا در خلیج فارس، استفاده از ایستگاه‌های جزرومدی ساحلی است. البته با فرض وجود ادوات اندازه‌گیری دقیق، اطلاعات مربوط به این گونه از مطالعات، به صورت محلی، قابل اعتماد است. با توجه به این که ایستگاه‌های ساحلی نمی‌توانند نماینده کل خلیج فارس باشند و بین اطلاعات ایستگاه‌ها، شکاف وجود دارد، این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای پردازش‌شده، به بررسی تغییرات سطح تراز دریا بدون در نظر گرفتن علل مربوطه (مانند سامانه‌های جوی (Afshar-Kaveh et al., 2018)) پرداخته است.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور بررسی سطح تراز دریا در خلیج فارس، داده‌های آنومالی سطح تراز دریا از دستگاه داده‌ای AVISO استخراج شد. این داده‌های ارتفاع‌سنجی، حاصل پردازش تصاویر ماهواره‌های مختلف در بازه‌های زمانی متفاوت است (جدول ۱) که پیش از این، در بررسی سطح تراز دریا در مطالعات مختلف استفاده شده است (Penduff et al., 2010; Merrifield et al., 2012; Prandi et al., 2012; Cid et al., 2014; Kumar et al., 2017; Schmidt et al., 2017; Cipollini et al., 2017; Kumar et al., 2018) و همچنین این داده‌ها، در بررسی جریان (Krug and Tournadre, 2012) و ادی (Faghmous et al., 2015; Yi et al., 2015; Delepouille et al., 2018) نیز کارآمد بوده است. این داده‌ها، از کنوانسیون متادیتا، با همکاری پروژه خدمات پایش کوپرنیکوس و محیط زیست (The Copernicus Marine and Environment Monitoring Service) با علامت اختصاری CMEMS (<http://www.marine.copernicus.eu>) و بر اساس ارتفاع‌سنجی SSALTO/DUACS استفاده می‌کند. زمان تاخیر SSALTO/DUACS، جهت پردازش ارتفاع‌سنجی سطح تراز دریا L4 است. گواهینامه این دستگاه داده در لینک <http://marine.copernicus.eu/web/27-service-commitments-and-licence.php> قرار دارد.

اطلاعات موجود در این دستگاه داده، در جدول ۲ آمده است. این مجموعه داده، علاوه بر ارائه موقعیت جغرافیایی و زمان، آنومالی تراز

جدول ۱- مرجع‌های مختلف ماهواره‌ای در ایجاد داده‌های AVISO (<http://www.marine.copernicus.eu>)
 Table 1- Various satellite references in creating AVISO data (<http://www.marine.copernicus.eu>).

نام ماهواره	تاریخ میلادی		تاریخ شمسی	
	پایان	شروع	پایان	شروع
Topex/Poseidon	2002-04-23	1993-01-01	۳ اردیبهشت ۱۳۸۱	۱۱ دی‌ماه ۱۳۷۱
Jason-1	2008-10-18	2002-04-24	۲۷ مهر ۱۳۸۷	۴ اردیبهشت ۱۳۸۱
OSTM/Jason-2	2016-06-25	2008-10-19	۵ تیر ۱۳۹۵	۲۸ مهر ۱۳۸۷
Jason-3	2017-12-31	2016-06-25	۱۰ دی‌ماه ۱۳۹۶	۶ تیر ۱۳۹۵

جدول ۲- کمیت‌های موجود در داده‌های AVISO (AVISO+, 2018)
 Table 2- The various parameters in AVISO data (AVISO+, 2018).

مرجع	دقت	واحد	نام کمیت
گرینویچ	۰/۲۵ درجه	درجه	موقعیت جغرافیایی طول عرض
تاریخ 1950-01-01 00:00:00	یک روز	روز	زمان
	۰/۱ mm/s	متر بر ثانیه	سرعت زمینگرد مطلق مداری نصف‌النهاری Absolute geostrophic velocity) (components
سطح متوسط دریا (MSL): متوسط جهانی 1993-2012	۰/۱ mm	متر	آنومالی سطح تراز دریا

جدول ۳- تعداد روزهای مورد استفاده در تهیه میانگین فصلی از ۲۵ سال داده ارتفاع‌سنجی AVISO (SSALTO/DUACS)
 Table 3- The number of days used in preparing the seasonal average of 25 years of altimetry data of AVISO (SSALTO/DUACS).

فصل	ماه‌های میلادی هر فصل	میانگین تعداد روز در هر سال (کیسه)	جمع داده‌ها (روز)
بهار	April, May, June	۹۱ (۹۱)	۲۲۷۵
تابستان	July, August, September	۹۲ (۹۲)	۲۳۰۰
پاییز	October, November, December	۹۲ (۹۲)	۲۳۰۰
زمستان	January, February, March	۹۰ (۹۱)	۲۲۵۶

۳. نتایج

شکل ۳، متوسط آنومالی تراز دریا را طی ۲۵ سال از ۱۱ دی ماه ۱۳۷۱ الی ۱۰ دی ماه ۱۳۹۶ در حوضه خلیج فارس نشان می‌دهد. به خوبی دیده می‌شود که آنومالی تراز دریا در کل حوضه خلیج فارس مثبت و بیش از ۲/۴ cm است که به صورت یکنواخت و منظم توزیع نشده است. میانگین آنومالی تراز دریا در کل حوضه، برابر با $3/06 \pm 0.5$ cm (SD میانگین) است و از مقدار بیشینه ۳/۴۲ cm تا مقدار کمینه ۲/۴۶ cm تغییر می‌کند و لذا دامنه تغییرات آنومالی ۹۶ cm (۹/۶ mm) می‌باشد. طبق شکل ۳، برخی مناطق که خاکستری تیره و سیاه‌رنگ هستند، بیشتر مستعد افزایش تراز دریا هستند و آنومالی تراز دریا در این نواحی به بیش از ۳/۲ cm می‌رسد. این مناطق، ناحیه‌های بین طول جغرافیایی $52^{\circ}E$ الی $55^{\circ}E$ ، در بخش جنوبی خلیج و بین طول جغرافیایی $50^{\circ}E$ الی $51^{\circ}E$ ، را در برمی‌گیرد. در برخی نواحی دیگر مانند شمال غربی خلیج در نزدیکی اروندرود، عراق و کویت (بین طول جغرافیایی $48^{\circ}E-48^{\circ}E$) کمتر تراز دریا افزایش می‌یابد و آنومالی تراز دریا در این نواحی کمتر از ۲/۷ cm است که در شکل ۳، با رنگ خاکستری بسیار روشن نشان داده شده است. پس در نتیجه متوسط ۲۵ ساله از آنومالی تراز دریا در جای به جای خلیج فارس از سر خلیج به طرف تنگه هرمز، فرق می‌کند به طوری که آنومالی تراز دریا در برخی مناطق، بیشتر از مناطق دیگر افزایش می‌یابد.

جدول ۴، خلاصه اطلاعات کمی هر فصل مربوط به کل حوضه را بیان می‌کند. میانگین آنومالی تراز دریا در فصل بهار $0/21 \pm 1/4$ cm، فصل تابستان، $0/29 \pm 3/50$ cm، فصل پاییز $0/19 \pm 7/59$ cm و فصل زمستان $0/31 \pm 0/93$ cm است. به عبارتی بیشترین میانگین آنومالی تراز دریا در فصل پاییز و کمترین میانگین آنومالی خلیج فارس، در فصل بهار رخ می‌دهد. به علاوه، بیشترین مقدار آنومالی نیز مربوط به فصل پاییز است ($9/13$ cm) و کمترین مقدار آنومالی به فصل زمستان ($1/13$ cm) برمی‌گردد. فصل بهار و تابستان نیز مقادیر منفی آنومالی دارند که کمترین آن‌ها به ترتیب برابر با $0/77$ cm - $1/05$ cm است. علامت منفی بیانگر آن است که تراز دریا در پایین‌تر از MSL قرار دارد. بیشترین دامنه تغییرات آنومالی در سرتاسر حوضه، مربوط به فصل تابستان ($7/27$ cm) و کمترین دامنه تغییرات مربوط به فصل پاییز ($3/60$ cm) است. پس به عبارتی اگرچه بیشترین آنومالی تراز دریا مربوط به فصل پاییز است، اما کمترین دامنه تغییرات آنومالی در کل حوضه، نسبت به سایر فصل‌ها دارد. فصل زمستان نیز که کمترین مقادیر آنومالی را دارد، اما بیشترین دامنه تغییرات را ندارد و بیشترین دامنه تغییرات مربوط به فصل تابستان است.

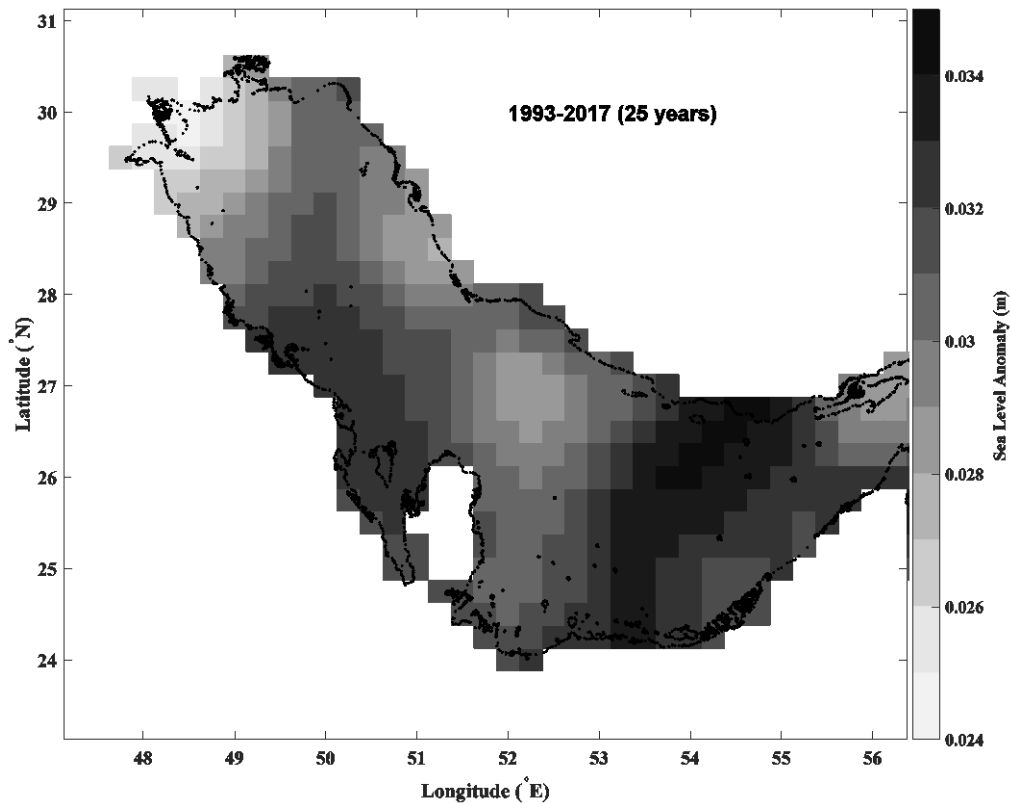
شکل ۴، توزیع فضایی تغییرات آنومالی سطح تراز دریا را در هر فصل نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل به خوبی دیده می‌شود، توزیع آنومالی تراز دریا در فصل بهار، مقادیر کمی دارد (کمتر از $2/0$ cm). اگر

در فصل بهار، خلیج فارس را به دو قسمت از نظر طول جغرافیایی (حدود $52^{\circ}E$) تقسیم کنیم، بخش وسیعی از خلیج فارس در فصل بهار، از شمال آن تا نیمه آن، مقدار آنومالی تراز دریای منفی یا صفر دارد که بلوک‌های آن در شکل ۴، توسط خط سیاه، از هم جدا شده‌اند. این بلوک‌ها از بندر کنگان کشور ایران به طرف جزیره صیر بنی‌یاس کشور امارات متحده عربی امتداد دارد. به عبارتی نیمه سمت چپ (حدود $52^{\circ}E$) از خلیج فارس در فصل بهار آنومالی تراز دریای منفی یا صفر دارد و نیمه سمت راست (حدود $52^{\circ}E$)، به طرف تنگه هرمز، آنومالی‌های اندک و مثبت کمتر از $2/0$ cm دارد. در فصل بهار، طبق شکل ۴، در نزدیکی بحرین هم آنومالی‌های مثبت بین $1/0$ cm الی $2/0$ cm وجود دارد. پس به عبارتی، افزایش آنومالی تراز دریا در فصل بهار، در کل حوضه خلیج فارس، کم و تقریباً بین $1/0$ - $2/0$ cm خواهد بود و متوسط کل حوضه نیز بسیار نزدیک به صفر ($0/21$ cm، جدول ۴) باقی می‌ماند.

در فصل تابستان، توزیع آنومالی سطح تراز دریا، در سرتاسر خلیج نسبت به فصل بهار افزایش می‌یابد اما مقادیر آنومالی تراز دریا، کمتر از $7/0$ cm باقی می‌ماند. بیشترین مقادیر آنومالی در سر خلیج فارس (در بخش شمال شرقی سر آن)، در نزدیکی بندر ديلم وجود دارد که با بلوک‌های سیاه، از سایر بخش‌های اطراف متمایز شده‌اند. با حرکت از این ناحیه به طرف تنگه هرمز، آنومالی تراز دریا کاهش می‌یابد. کمترین مقدار آنومالی در این فصل در پایین جزیره کیش و در نزدیکی تنگه هرمز در این فصل دیده می‌شود. این بخش نیز در فصل تابستان از شکل ۴، با خط سیاه در مرکز خلیج، مشخص شده است.

طبق شکل ۴، در فصل پاییز آنومالی تراز دریا نسبت به فصل تابستان بسیار افزایش می‌یابد به طوری که در کل حوضه، آنومالی تراز دریای منفی، دیگر مشاهده نمی‌شود. توزیع فضایی آن در هر نقطه خلیج به بیش از $5/0$ cm (حداقل آن $5/53$ cm (طبق جدول ۴) می‌رسد. دو بخش مجزا در میانه خلیج و در جنوب خلیج، در امتداد ساحل عربی، دارای آنومالی‌های تراز دریای بیش از $8/0$ cm می‌شوند که در شکل ۴، با خط سیاه، بلوک‌ها جدا شده‌اند. مقدار آنومالی تراز دریا بین $6/0$ cm الی $7/0$ cm، تنها در قسمت کوچکی از نواحی شمال‌غربی (سواحل خوزستان)، ایران، عراق و کویت و شمال تنگه هرمز (سواحل بندرعباس) و در نزدیکی جزیره کیش دیده می‌شود.

کاهش آنومالی تراز دریا در فصل زمستان، طبق شکل ۴ وجود دارد و حداکثر آنومالی سطح تراز دریا در این فصل، $3/91$ cm (جدول ۴) است. این کاهش آنومالی تراز دریا در سر خلیج فارس نسبت به فصل پاییز، بسیار چشمگیر است و به مقادیر منفی و زیر صفر نیز می‌رسد. اما هنوز بخش‌های ورودی تنگه هرمز، مناطق کم‌عمق جنوب خلیج فارس، نزدیکی بحرین، و مرکز خلیج، مقادیر آنومالی مثبت تراز دریا دیده می‌شود. میزان آنومالی تراز دریا اندک و از نظر مقدار و مساحت، در این فصل نسبت به فصل بهار، کاهش وجود دارد.



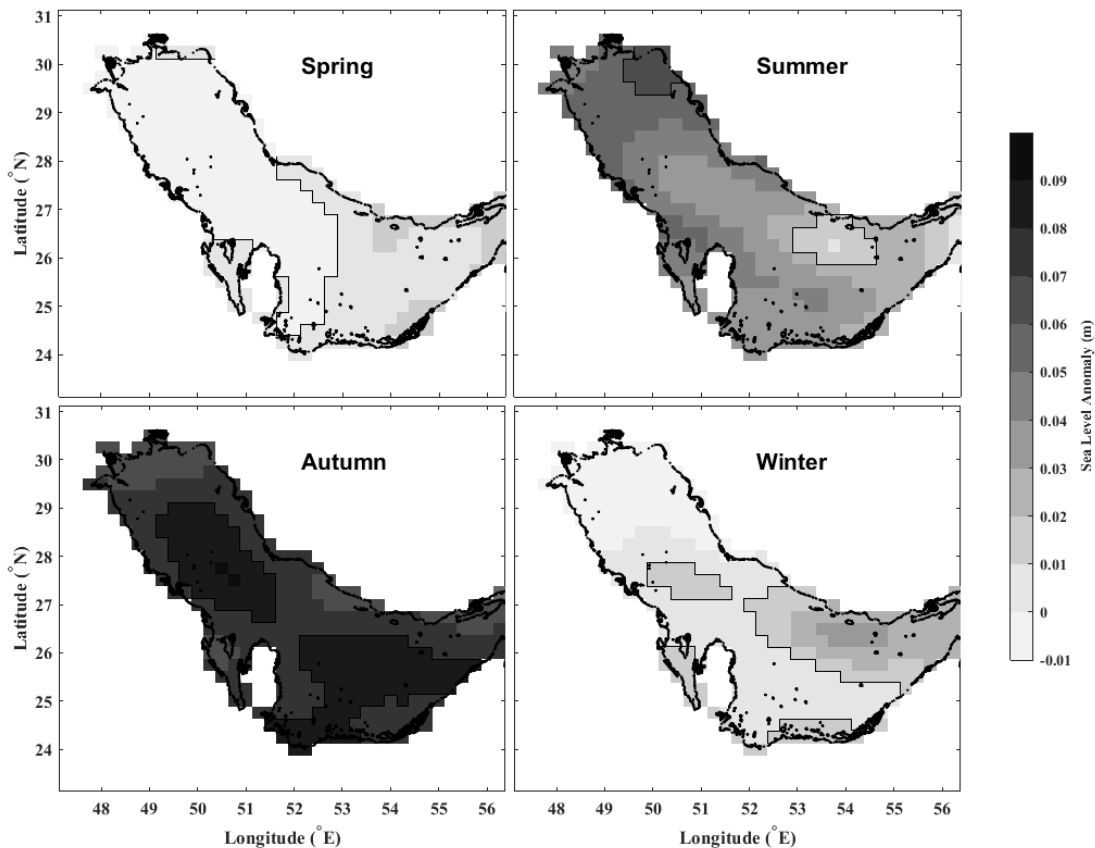
شکل ۳- متوسط ۲۵-ساله (۱۹۹۳ الی ۲۰۱۷) از آنومالی تراز دریا در خلیج فارس، براساس داده‌های میانگین روزانه ارتفاع سنجی (SSALTO/DUACS) AVISO.

Fig. 3- The 25-year average (1993 to 2017) of sea level anomaly in the Persian Gulf, based on mean daily altimetry data of AVISO (SSALTO/DUACS).

جدول ۴. نتایج حاصل از میانگین داده‌های ارتفاع سنجی روزانه SSALTO/DUACS، طی ۲۵ سال (۱ January 1993-31 December 2017) در کل حوضه خلیج فارس (بر حسب $m \times 10^{-2}$) برای هر فصل

Table 4- The results of the average daily altimetry data of SSALTO/DUACS during 25 years (1 January 1993-31 December 2017) in the entire Persian Gulf basin (in $\times 10^{-2}$ m) for every season.

فصل	SD± میانگین	حداقل	حداکثر	دامنه تغییرات
بهار	0.21 ± 0.14	-1.05	3.40	4/45
تابستان	3.50 ± 0.29	-0.77	6.50	7/27
پاییز	7.59 ± 0.19	5.53	9.13	3/60
زمستان	0.93 ± 0.31	-1.13	3.91	5/04



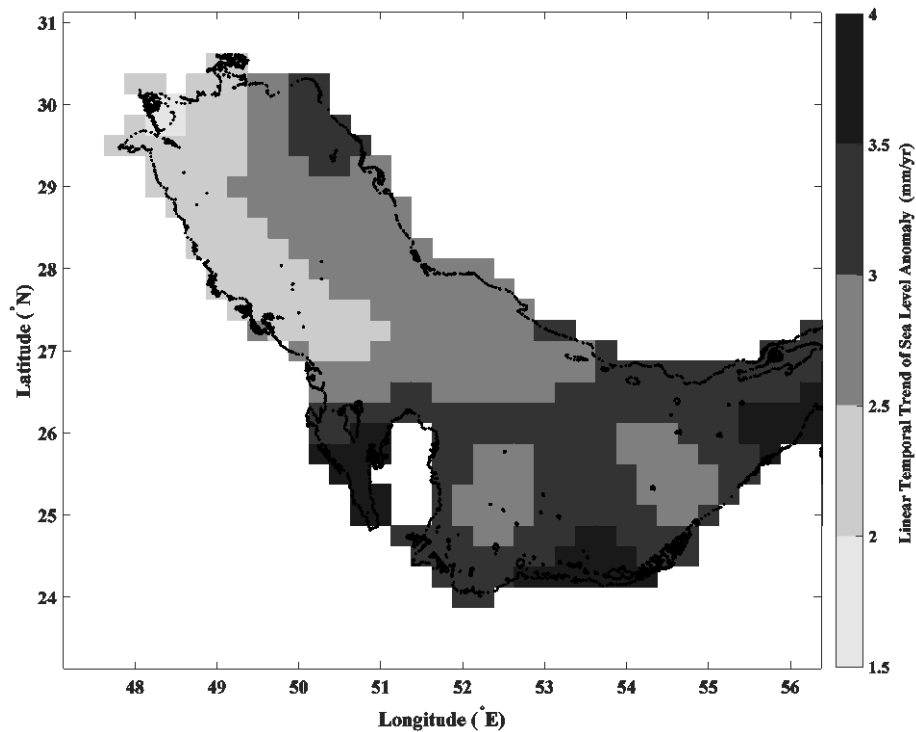
شکل ۴- متوسط ۲۵-ساله (۱۹۹۳ الی ۲۰۱۷) از آنومالی تراز دریا در خلیج فارس، در فصل‌های مختلف براساس داده‌های میانگین روزانه ارتفاع سنجی SSALTO/DUACS. توضیح در خصوص مرز بلوک‌های مشخص شده با رنگ سیاه، در متن آمده است.

Fig. 4- The 25-year average (1993 to 2017) of sea level anomaly in the Persian Gulf during different seasons, based on mean daily altimetry data of AVISO (SSALTO/DUACS). An explanation of the marked blocks in black lines is given in the text.

این واقعیت به این معناست که آهنگ‌های با افزایش بیشتر در امتداد سواحل جنوبی خلیج فارس و در جنوب تنگه هرمز اتفاق می‌افتد و در عوض در امتداد شمالی سواحل، آهنگ‌های با افزایش کمتر مشاهده می‌شود.

همچنین مقدار کمی داده‌های آماری نشان می‌دهد که میانگین آهنگ آنومالی سطح تراز دریا در خلیج فارس برابر $1/9 \pm 2/0$ mm/year (انحراف معیار \pm میانگین) است. نقاط مختلف خلیج فارس، دارای آهنگ‌های متغییر بین $1/9$ mm/year تا $3/8$ mm/year در هر سال هستند که دامنه تغییرات آهنگ افزایشی برابر با $1/9$ mm/year است. به عبارتی تراز دریای متوسط خلیج فارس هر سال به اندازه $1/9 \pm 2/0$ mm در سال افزایش می‌یابد که طی ۲۰۰ سال معادل با ۵۸ cm (نیم متر) خواهد بود.

شکل ۵، آهنگ تغییرات زمانی نوسانات آنومالی تراز دریا را نشان می‌دهد که طی این ۲۵ سال در هر نقطه از شبکه مکانی خلیج فارس (با قدرت تفکیک فضایی $25^{\circ}N \times 25^{\circ}E$)، محاسبه شده است. پیکسل‌های خاکستری در هر مکان، آهنگ تغییرات بلندمدت زمانی آنومالی‌های سطح تراز دریا در خلیج فارس است. به خوبی دیده می‌شود که آهنگ تغییرات زمانی سطح تراز دریا در خلیج فارس همواره به صورت مثبت و بیشتر از $1/5$ mm/year است. اما پیکسل‌های خاکستری رنگ عملاً خلیج فارس را به بخش‌هایی متفاوت با آهنگ‌های زمانی متفاوت تقسیم می‌کند: ۱- بخش شمال غربی نزدیک به ساحل عربی با آهنگ زمانی آنومالی تراز دریا با مقدار کمتر از $2/5$ mm/year؛ ۲- بخش شمالی و مرکزی خلیج با آهنگ زمانی آنومالی تراز دریا با مقدار بین $2/5$ mm/year الی $3/5$ mm/year؛ و ۳- بخش جنوبی خلیج و تنگه هرمز با آهنگ بیش از $3/5$ mm/year و کمتر از $4/0$ mm/year.



شکل ۵. آهنگ زمانی تغییرات خطی سالیانه از آنومالی تراز دریا در خلیج فارس با استفاده از ۲۵ سال داده AVISO (SSALTO/DUACS).

Figure 5. Time trends of linear annual changes of sea level anomaly in the Persian Gulf using 25 years data of AVISO (SSALTO/DUACS).

مقادیر بیش از $7/0$ cm (رنگ خاکستری تیره و سیاه، شکل ۴) دارد. تراز دریا با گذر از پاییز و حرکت به سمت بهار به شدت کاهش می‌یابد (میانگین: $0/21$ cm). در هر دو فصل زمستان و تابستان مقادیر منفی و مثبت آنومالی تراز دریا به خوبی دیده می‌شود. میانگین آنومالی تراز دریا در فصل زمستان برابر با $0/93$ cm و در فصل تابستان برابر با $3/50$ است. در فصل زمستان بیشینه آنومالی در بخش جنوبی خلیج به طرف تنگه هرمز (طول جغرافیایی بیش از 53° E) دیده می‌شود و مقدار آن برابر با $3/91$ cm است. در فصل تابستان بیشینه آنومالی در بخش شمالی خلیج (طول جغرافیایی کمتر از 50° E) و به ویژه در نوار ساحلی دیده می‌شود و مقدار آن برابر با $6/50$ cm است.

این نوسانات تغییرات فصلی آنومالی تراز دریا به خوبی حرکت موج‌گونه را بیان می‌کند، اما باید توجه داشت که می‌تواند تحت تأثیر سیستم‌های آب و هوایی منحرف شود (Afshar-Kaveh et al., 2018; Cazenave et al., 2018) که در این مطالعه سیستم‌های آب و هوایی سطح خلیج فارس بررسی نشده است و بررسی فصول ملاک این حرکت نوسانی موج‌گونه قرار گرفته است. نتایج شکل ۴، به خوبی نشان می‌دهد که یک قرینه‌گی نسبی از نظر الگوی مکانی در برخی از فصل‌ها وجود دارد. در فصل بهار، کمترین آنومالی تراز دریا و در فصل پاییز بیشترین آنومالی تراز دریا در کل حوضه خلیج فارس دیده

۴. بحث

شکل ۳، به خوبی نشان می‌دهد که توزیع فضایی آنومالی تراز دریا در هر نقطه از خلیج مقداری مثبت و بیشتر از $2/4$ cm است. این متوسط ۲۵ ساله از آنومالی تراز دریا در نقاط مختلف حوضه فرق می‌کند و گستره تغییراتی بیش از $10/0$ cm دارد. در مطالعه دریای آرام غربی نیز که از داده‌های AVISO برای بازه زمانی ۸ ساله (1993–2010) استفاده شده بود که توزیع فضایی آنومالی تراز دریا در بخش‌های مختلف دریا فرق می‌کرد. در برخی مناطق مقادیر مثبت و در برخی مناطق مقادیر منفی حاکم بود که دارای گستره تغییراتی بیش از $2/5$ cm بود (Merrifield et al., 2012).

باید در نظر داشت که تراز دریا پارامتری استاتیک نیست (Levermann et al., 2005)، یعنی تغییرات آن در مکان و زمان مهم است. آنچه که از مجموعه شکل ۴ بر می‌آید نوعی حرکت موجی شکل برای آنومالی تراز دریا بین فصل‌های سال است. مقایسه فصل‌ها نشان می‌دهد که توزیع فضایی آنومالی تراز دریا در فصل بهار، در پایین‌ترین سطح خود است و بخش اعظم خلیج، مقادیر کمتر از $1/0$ cm (رنگ خاکستری روشن، شکل ۴) دارد. در فصل پاییز (میانگین: $7/59$ cm)، در بالاترین سطح خود می‌رسد و بخش اعظم خلیج فارس

شکل ۵ نیز بیان می‌کند که آهنگ افزایشی زمانی تغییرات آنومالی تراز دریا در هر نقطه از خلیج فارس، مقداری مثبت است و میانگین آن برابر $2/0 \pm 9/1$ mm/year (انحراف معیار \pm میانگین) است. مقدار متوسط جهانی افزایش سطح تراز دریا به علت گرمایش جهانی و ذوب شدن یخ‌ها برابر با $1/7 \pm 0/3$ mm/year (انحراف معیار \pm میانگین) است (Church and White, 2006). اختلاف آهنگ زمانی آنومالی تراز دریای خلیج فارس که با استفاده از داده‌های AVISO به دست آمده است، با متوسط جهانی برابر با $1/2$ mm/year است. پس بنابراین، سطح خلیج فارس با آهنگ سریع‌تری نسبت به متوسط جهانی در حال افزایش است که علاوه بر افزایش سطح تراز جهانی، می‌تواند به علت حرکت صفحه عربستان (-15 mm/year, Reilinger et al., 1997) به طرف صفحه ایران و کوچک‌تر شدن خلیج فارس باشد. در مطالعه Alothman et al. (2014) که با توجه به داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری واقع در بخش شمال غرب خلیج فارس و با ۲۸ سال داده انجام شده است نیز آهنگ زمانی آنومالی تراز دریای خلیج فارس برابر با $2/2 \pm 0/5$ mm/year (انحراف معیار \pm میانگین) به دست آمده است که باز هم در مطالعه حاضر مقدار آنومالی تراز دریا به اندازه $0/7$ mm/year بیشتر به دست آمده است. از آنجایی که ایستگاه‌های اندازه‌گیری مطالعه Alothman et al. (2014) در شمال غرب خلیج فارس واقع بوده‌اند، نمی‌توانند بیانگر کل حوضه باشند. شکل ۳ و ۵ به خوبی نشان می‌دهد که آنومالی تراز دریا و آهنگ آن در بخش جنوبی خلیج فارس بیشتر از شمال غرب است و از این رو مقدار بیشتر به دست آمده در مطالعه حاضر ($2/0 \pm 9/1$ mm/year) نسبت به مطالعه Alothman et al. (2014)، ($2/2 \pm 0/5$ mm/year) می‌تواند به علت در نظر گرفتن بخش جنوبی خلیج فارس برگردد. مقایسه نتایج حاصل از مطالعه حاضر، با نتایج حاصل از داده‌های جزرومدی ساحلی مورد مطالعه Hosseinibalam et al. (2007) در دوره آماری ۱۱ ساله (1990-2000) نشان می‌دهد که آهنگ افزایش آنومالی تراز دریا در مطالعه Hosseinibalam et al. (2007) برابر با $2/34$ mm/year است که باز هم به اندازه $0/6$ mm/year بیشتر از مطالعه حاضر است. از آنجایی که در مطالعه Hosseinibalam et al. (2007)، ایستگاه‌های جزرومدی در نوار بخش ساحلی (شمالی و جنوبی) متمرکز بوده‌اند، لذا نمی‌توان این اطلاعات این مطالعه را نیز به کل خلیج فارس تعمیم داد. شکل ۳ و ۵ نشان می‌دهد که بخش مرکزی خلیج می‌تواند متفاوت با بخش ساحلی آن باشد و لذا مطالعه حاضر به علت در نظر گرفتن بخش مرکزی در محاسبات، علاوه بر بخش نوار ساحلی، ارجحیت بیشتری نسبت به مطالعه Hosseinibalam et al. (2007) دارد. پس بر این اساس یا در نظر گرفتن افزایش تراز دریای خلیج فارس به اندازه $0/1 \pm 2/9$ در هر سال، منجر به افزایشی معادل 58 cm (نیم متر) طی ۲۰۰ سال (معادل 29 m در هر ده هزار سال) خواهد شد که طبق شکل ۱ (Revelle et al., 1990)

می‌شود (شکل ۴ و جدول ۴ را مجدد ببینید). تفاوت بین دو فصل زمستان و تابستان نیز این نوع قرینه‌گی نسبی مورد تأیید قرار می‌دهد (شکل ۴). در فصل تابستان با حرکت از سر خلیج به طرف تنگه هرمز، آنومالی تراز دریا کاهش می‌یابد و برعکس، در فصل زمستان با حرکت از سر خلیج به طرف تنگه هرمز، آنومالی تراز دریا افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که دو فصل تابستان و زمستان به صورت فصل گذار از بیشینه پاییزه به کمینه بهار مطرح است. گستره افت و خیز پاییزه و بهار آنومالی تراز دریا برابر با $7/38$ cm است. اگرچه این حرکت موجی شکل از آنومالی تراز دریا پیش از این در خلیج فارس گزارش نشده است اما حرکت موجی شکل تراز دریا در خلیج فارس گزارش شده است. طبق تحلیل ماهیانه‌ی داده‌های ۱۱ ساله (1980-1990) از تراز دریا در دو ایستگاه جزرومدی Rastanura و Safaniya، کشور عربستان، خیز تابستانه این ایستگاه‌ها (به ترتیب 446 cm و 430 cm) و افت زمستانه این ایستگاه‌ها (به ترتیب 397 cm و 378 cm) گزارش شده است که متوسط گستره افت و خیز تراز دریا، 26 cm در بین این دو ایستگاه است (Sultan et al., 1995).

همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که بخش جنوبی خلیج فارس و تنگه هرمز، متفاوت از سر خلیج فارس، است. نواحی که با آنومالی‌های منفی در شمال و شمال غرب خلیج فارس در فصل زمستان دیده می‌شوند، با در نظر گرفتن تشدید بادهای شمال زمستانه در نواحی غربی و شمال غربی خلیج فارس (Thoppil and Hogan, 2010b) هم‌ارز و منطقی است. زیرا تنش باد وارد بر سطح دریا در محل اعمال اثر خود، منشائی برای شکل‌گیری جریان اکمن افقی است که این جریان منجر به نوعی واگرایی در آب‌های سطحی شده (Thoppil and Hogan, 2010b) و کاهش ارتفاع تراز دریا در محل شکل‌گیری جریان اکمن را به وجود می‌آورد (Tomczak and Godfrey, 2013). برعکس، نواحی که در تابستان تراز دریا مثبت می‌شود، می‌تواند به افزایش آهنگ تابش خورشیدی و افزایش عمق لایه ترموکلاین (Tomczak and Godfrey, 2013) و انبساط حجمی آب‌های سطحی مربوط شود که افزایش تراز سطح دریا را در پی خواهد داشت. به‌بیانی دیگر، ارتفاع تراز دریا تحت‌اثر عمق ترموکلاین و جریانات سطحی گوناگون می‌تواند به سمت‌های متفاوتی چه مثبت و چه منفی متمایل شود. در عین حال عدم تعادل تراز دریا در یک حوضه نیم‌بسته و تقابلی آنومالی‌های مثبت و منفی، ایجادکننده جریان سطحی زمینگرد (Surface geostrophic current) در جهت برقراری مجدد تعادل تراز دریای سطحی و شکل‌گیری چرخه فصلی خواهد بود (Park, 2004). موقعیت برخی از برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های شکل ۴ در فصل پاییز و زمستان متناظر با موقعیت نسبی گردش نشان داده شده از شکل ۲ (Reynolds, 1993)، است که می‌تواند به دلیل برقراری مجدد تعادل در تراز دریا، قسمت مرکزی خلیج، این نقش را به خوبی ایفا کند.

(Hogan, 2010b)، انتقال اکمن ناشی از تنش باد، در مبدا خود منجر به واگرایی و در نتیجه کاهش تراز دریا می‌شود، و در مقصد (انتهای خلیج) همگرایی ناشی از جمع‌شدن آب‌های منتقل شده را به همراه خواهد داشت که این مهم سبب افزایش روند تراز دریا در بخش جنوبی سواحل عربی خلیج فارس می‌شود.

در یک نتیجه‌گیری کلی، با بررسی نتایج چرخه سالیانه آنومالی تراز دریا با داده‌های روزانه طی ۲۵ سال می‌توان بیان نمود که به‌طور عمده، آنومالی تراز خلیج فارس اگرچه مثبت ($0/1 \pm 2/9$) است اما به‌صورت موجی با دوره تناوب سالیانه تغییر می‌کند که این موج با افتی در اوایل بهار (ناشی از الگوهای باد زمستانه شمال) و خیزی در اواسط پاییز (ناشی از تغییر در آهنگ تابش خورشیدی و انبساط حجمی آب‌های سطحی) همراه است. برخی از قسمت‌های خلیج فارس که در فصل زمستان آنومالی منفی دارند با شروع فصل تابستان درگیر آنومالی مثبت تراز دریا شده و به همین ترتیب نواحی که در فصل زمستان، آنومالی‌های مثبت داشتند با شروع فصل تابستان درگیر آنومالی‌های منفی تراز دریا می‌شوند که می‌توان الگوهای مکانی آنومالی تراز دریا را طی ماه‌های سرد و گرم سال به‌صورت دوقطبی قلمداد کرد که این نتیجه تا پیش از این توسط مطالعات قبلی بیان نشده بود. همچنین، سواحل ایرانی و عربی (شمالی و جنوبی) خلیج فارس از منظر تغییرات تراز دریا، الگوهای قابل توجه و معنی‌داری از نظر اقیانوس‌شناسی فیزیکی دارد که در نظر گرفتن این الگوها در مطالعات آتی حیاتی است.

(Sahagian and Jones, 1993)، مقدار بسیار زیاد و قابل توجهی است. این مقدار افزایش تراز دریا، بیشتر از تاثیر انبساط گرمایی آب‌دریای اقیانوسی (کمتر از ۱۰ m در هر ده هزار سال (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993)) و جابه‌جایی کف اقیانوس (حدود ۵ m تغییر در سطح تراز دریا در هر ده هزار سال (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993)) و کمتر از تاثیر ذوب‌شدن یخ‌های قاره‌ای (۲۰۰ m در هر ده هزار سال (Revelle et al., 1990; Sahagian and Jones, 1993)) است (شکل ۱ را ببینید).

طبق شکل ۵، آهنگ‌های با تغییرات آنومالی تراز دریا با مقدار مثبت بیشتر در امتداد سواحل جنوبی خلیج فارس، در نزدیکی بحرین و جنوب تنگه هرمز (رنگ خاکستری تیره) رخ داده و در عوض در امتداد شمالی سواحل و شمال غرب خلیج فارس به دلیل وجود بادهای شمال (Thoppil and Hogan, 2010b)، آهنگ‌های با تغییرات آنومالی تراز دریا با مقدار مثبت کمتر مشاهده می‌شود. پس خلیج فارس، اولاً به علت رخدادهای و شرایط منحصر بر منطقه‌ای خود، با سرعت بیشتری به افزایش ارتفاع سطح دریای خود نسبت به متوسط جهانی ($1/7 \pm 0/3$ mm/year) (Church and White, 2006) ادامه می‌دهد. و ثانیاً به دلیل وجود بادهای شمال (Thoppil and Hogan, 2010b)، و تنش‌یاد در شمال خلیج فارس، آهنگ‌های با افزایش بیشتر در امتداد سواحل جنوبی خلیج فارس اتفاق می‌افتد. یعنی در واقع با توجه به جهت وزش بادهای غالب منطقه (سمت غرب و شمال غرب؛ Thoppil and

References:

- Afshar-Kaveh, N., Ghaheri, A., Chegini, V. and Nazarali, M. 2018. Prediction of nontidal sea level variations in the Persian Gulf using data assimilation techniques. *Coastal Engineering Journal*, 60(3), pp. 340-355.
- Allothman, A.O., Bos, M.S., Fernandes, R.M.S. and Ayhan, M.E. 2014. Sea level rise in the north-western part of the Arabian Gulf. *Journal of Geodynamics*, 81, pp.105-110.
- Antonov, J.I., Levitus, S. and Boyer, T.P. 2005. Thermosteric sea level rise, 1955–2003. *Geophysical Research Letters*, 32(12).
- AVISO+. 2018. "SSALTO/DUACS user handbook:(M) SLA and (M) ADT near-real time and delayed time products," Rep. CLS-DOS-NT 6, 51. <https://www.avisio.altimetry.fr>
- Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J.M., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quere, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D. and Unnikrishnan, A.S. 2007. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level, Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK and NY, USA, pp. 385-432.
- Bouttes, N., Gregory, J.M., Kuhlbrodt, T. and Smith, R.S. 2014. The drivers of projected North Atlantic sea level change. *Climate dynamics*, 43(5-6), pp. 1531-1544.
- Cambridge Dictionary. 2008. *Cambridge online dictionary*, Cambridge University Press. Retrieved at July 21, 2019, from the website: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/anomaly>
- Cazenave, A., Meyssignac, B., Ablain, M., Balmaseda, M., Bamber, J., Barletta, V., Beckley, B., Benveniste, J., Berthier, E., Blazquez, A., Boyer T. et al., 2018. Global sea-

- level budget 1993-present. *Earth System Science Data*, 10(3), pp. 1551-1590.
- Church, J.A. and White, N.J. 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical research letters*, 33(1).
- Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. and Woodworth, P.L. 2001. Changes in sea level. In *JT Houghton, Y. Ding, DJ Griggs, M. Noguer, PJ Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and CA Johnson (eds.): Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel* (pp. 639-694).
- Cid, A., Castanedo, S., Abascal, A.J., Menéndez, M. and Medina, R. 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Climate dynamics*, 43(7-8). pp. 2167-2184.
- Cipollini, P., Calafat, F.M., Jevrejeva, S., Melet, A. and Prandi, P. 2017. Monitoring sea level in the coastal zone with satellite altimetry and tide gauges. In *Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components* (pp. 35-59). Springer, Cham.
- Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F.M., Marcos, M., Piecuch, C.G., Berk, K. and Jensen, J. 2019. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, 9(9), pp. 705-710.
- Delepoulle, A., Chelton, D., Schlab, M., Faugere, Y. and Dibarbouré, G. 2018. 24 years mesoscale eddy trajectory atlas on AVISO. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 20, April. p. 13690).
- Faghmous, J.H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A. and Kumar, V. 2015. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. *Scientific data*, 2: 150028.
- Emami, M., Soyuf Jahromi, M. and Behmanzadegan Jahromi, A.L. 2019. Coastline effect on tidal flow pattern. *Journal of Marine Science and Technology*, 18 (2), pp.12-25.
- Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V.W., Dangendorf, S., Hogarth, P., Zanna, L., Cheng, L. and Wu, Y.H. 2020. The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, 584(7821), pp.393-397.
- Gera, A., Mitra, A.K., Mahapatra, D.K., Momin, I.M., Rajagopal, E.N. and Basu, S. 2016. Sea surface height anomaly and upper ocean temperature over the Indian Ocean during contrasting monsoons. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 75, pp.1-21.
- Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean dynamics (International Geophysics Series)*. Academic press.
- Gornitz, V. 1995. Sea-level rise: A review of recent past and near-future trends. *Earth surface processes and landforms*, 20(1), pp.7-20.
- Gregory, J.M., Griffies, S.M., Hughes, C.W., Lowe, J.A., Church, J.A., Fukimori, I., Gomez, N., Kopp, R.E., Landerer, F., Cozannet, G.L., Ponte, R.M, Stammer, D., Tamisiea, M.E. and van de Wal, R.S.W. 2019. Concepts and terminology for sea level: mean, variability and change, both local and global. *Surveys in Geophysics*, 40(6), p:1251-1289.
- Hassanzadeh, S., Kiasatpour, A. and Hosseinibalam, F. 2007. Sea-level response to atmospheric forcing along the north coast of Persian Gulf. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 95(3-4), pp.223-237.
- Hosseinibalam, F., Hassanzadeh, S. and 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.
- <http://marine.copernicus.eu/web/27-service-commitments-and-licence.php>
- <http://www.marine.copernicus.eu>
- Krug, M. and Tournadre, J. 2012. Satellite observations of an annual cycle in the Agulhas Current. *Geophysical Research Letters*, 39(15).
- Kumar, P., Hamlington, B., Thompson, P.R. and Han, W. 2017. Improved Reconstructed Sea-Level Dataset for the Indian Ocean. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (December).
- Kumar, P., Hamlington, B., Thompson, P.R., Han, W. and Cheon, S.H. 2018. Decadal Internal Sea-Level variability in the Indian Ocean studied using a New Bivariate Regionally Reconstructed Sea-Level Dataset. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (December).
- Landerer, F.W., Jungclaus, J.H. and Marotzke, J. 2007. Regional dynamic and steric sea level change in response to the IPCC-A1B scenario. *Journal of Physical Oceanography*, 37(2), pp. 296-312.
- Levermann, A., Griesel, A., Hofmann, M., Montoya, M. and Rahmstorf, S. 2005. Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics*, 24(4), pp.347-354.
- Merrifield, M.A., Thompson, P.R. and Lander, M. 2012. Multidecadal sea level anomalies and trends in the western tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, 39(13).

- Miller, K.G., Kominz, M.A., Browning, J.V., Wright, J.D., Mountain, G.S., Katz, M.E., Sugarman, P.J., Cramer, B.S., Christie-Blick, N. and Pekar, S.F. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *science*, 310(5752), pp.1293-1298.
- Park, Y.H. 2004. Determination of the surface geostrophic velocity field from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C5).
- Penduff, T., Juza, M., Brodeau, L., Smith, G.C., Barnier, B., Molines, J.M., Tréguier, A.M. and Madec, G. 2010. Impact of global ocean model resolution on sea-level variability with emphasis on interannual time scales. *Ocean Science*, 6, pp.269-284.
- Prandi, P., Ablain, M., Cazenave, A. and Picot, N. 2012. A new estimation of mean sea level in the Arctic Ocean from satellite altimetry. *Marine Geodesy*, 35(sup1), pp. 61-81.
- Purser, B.H. (Ed.). 2012. *The Persian Gulf: Holocene carbonate sedimentation and diagenesis in a shallow epicontinental sea*. Springer Science & Business Media. pp. 472.
- Radić, V. and Hock, R. 2011. Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nature Geoscience*, 4(2), p.91.
- Reilinger, R.E., McClusky, S.C., Oral, M.B., King, R.W., Toksoz, M.N., Barka, A.A., Kinik, I., Lenk, O. and Sanli, I. 1997. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B5), pp. 9983-9999.
- Revelle, R., Barnett, T.P. and Barron, E.J. 1990. Sea-level change. *Studies in geophysics. National Research Council. National Academy Press, Washington, DC*, 234.
- 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, pp. 35-59.
- Ruiz Etcheverry, L.A., Saraceno, M., Piola, A.R. and Strub, P.T. 2016. Sea level anomaly on the Patagonian continental shelf: Trends, annual patterns and geostrophic flows. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(4), pp. 2733-2754.
- Sahagian, D. and Jones, M. 1993. Quantified Middle Jurassic to Paleocene eustatic variations based on Russian Platform stratigraphy: Stage level resolution. *Geological Society of America Bulletin*, 105(8), pp.1109-1118.
- Salarijazi, M. 2019. Estimation of rating curve in river's tidal limit using long term and tidal flood data. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), pp.43-61.
- Schmidt, J. Dangendorf, S. Calafat, F.M., Patzke, J., Jensen, J. and Fröhle, P. 2017. A novel tide gauge dataset for the Baltic Sea-Part 1: Spatial features and temporal variability of the seasonal sea level cycle. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 19, April).
- Slater, T., Hogg, A.E. and Mottram, R. 2020. Ice-sheet losses track high-end sea-level rise projections. *Nature Climate Change*, 10(10), pp. 879-881.
- Subbotina, M.M., Thomson, R.E. and Rabinovich, A.B. 2001. Spectral characteristics of sea level variability along the west coast of North America during the 1982–83 and 1997–98 El Niño events. *Progress in Oceanography*, 49(1-4), pp. 353-372.
- Sultan, S.A.R., Ahmad, F., Elghribi, N.M. and Al-Subhi, A.M. 1995. An analysis of Arabian Gulf monthly mean sea level. *Continental Shelf Research*, 15(11-12), pp.1471-1482.
- The MathWorks Inc. 2016. MATLAB and Statistics Toolbox 64-bit, Version 2016a, Release 2016a, Natick, Massachusetts, USA.
- Thoppil, P.G. and Hogan, P.J. 2010a. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical oceanography*, 40(9), pp.2122-2134.
- Thoppil PG. and Hogan PJ. 2010b. Persian Gulf response to a wintertime shamal wind event. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(8), pp.946-955.
- Timmermann, A., McGregor, S. and Jin, F.F. 2010. Wind effects on past and future regional sea level trends in the southern Indo-Pacific. *Journal of Climate*, 23(16), pp. 4429-4437.
- Tomczak, M. and Godfrey, J.S. 2013. *Regional oceanography: an introduction*. Elsevier. pp. 422.
- Walsh, J.E., Chapman, W.L. and Shy, T.L. 1996. Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic. *Journal of Climate*, 9(2), pp. 480-486.
- Xue, P. and Eltahir, E.A. 2015. Estimation of the heat and water budgets of the Persian (Arabian) Gulf using a regional climate model. *Journal of Climate*, 28(13), pp.5041-5062.
- Yi, J., Du, Y., Zhou, C., Liang, F. and Yuan, M. 2015. Automatic identification of oceanic multieddy structures from satellite altimeter

datasets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4), pp.1555-156.



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



The seasonal changes of sea-level anomalies on the Persian Gulf (1993-2017)

Maryam Soyuf Jahromi*, Zohreh Shahmansoori

Department of Nonliving sciences of Atmosphere and Ocean, Faculty of Marine Sciences and Technology, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran.

*Corresponding Author E-mail: soyufjahromi@hormozgan.ac.ir

Received: 5 August 2019

Revised: 19 February 2021

Accepted: 21 February 2021

DOI: 10.22113/JMST.2021.197166.2303

Abstract

In this study, sea level anomaly of Persian Gulf (spatial resolution of 0.25 degrees of latitudes and longitudes) was investigated in the MATLAB software environment by using long-term AVISO data for 25 years (1 January 1993 to 31 December 2017). The 25-year average of the data shows that the sea level anomaly is positive and equals 3.06 ± 0.05 cm (mean \pm standard deviation), which is higher than the global average. Its range varies from a minimum of 2.46 cm to a maximum of 3.42 cm. The 25-year average of each season illustrates that sea level anomalies face a rise in autumn and a fall in spring. The two seasons of summer and winter are transition seasons from the maximum anomaly of autumn to the minimum anomaly of spring. The results also show that the spatial distribution of sea level anomaly in the basin is different. The mean sea level anomaly trend in the Persian Gulf is $+2.9 \pm 0.1$ mm/year, which practically divides Persian Gulf in the three parts of northwestern parts near the Arabian coast (anomalies less than 2.5 mm/year), the northern and central parts of the gulf (anomalies of 2.5-5.5 mm/year) and the southern part of the gulf and Strait of Hormuz (anomalies more than 3.5 mm/year). Therefore, although the head of Persian Gulf has positive trend changes, it is less than its southern part and near the Strait of Hormuz. If the Persian Gulf Sea level continues to rise, over the next 200 years, the Persian Gulf sea level will rise more than 0.5 m, with significant changes in the size and area of the basin.

Keywords: Sea level anomaly, Seasonal variations, The AVISO data set, SSALTO/DUACS, MATLAB.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

