

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.2.6

درصد همانندی: ۰٪

ارزیابی بهبود شبیه‌سازی انرژی جنبشی پیچکی (EKE) در دریای خزر با استفاده از داده‌های بازتخلی Era5 در مقایسه با Era-Interim

منیژه وثوقی^۱، داریوش منصوری^۲^۱ دانش‌آموخته اقیانوس‌شناسی فیزیکی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. manijehvosoughi58@gmail.com^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. mansoury@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶

چکیده

این مطالعه به بررسی تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (EKE) در دریای خزر با استفاده از مدل اقیانوس سی Princeton Ocean Model و دو مجموعه داده بازتخلی Era5 و Era-Interim می‌پردازد. پژوهش حاضر با وضوح افقی ۳ کیلومتر و ۳۵ لایه قائم برای دوره ۱۰ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۹) اجرا شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های Era5 منجر به بهبود قابل توجهی در شبیه‌سازی EKE می‌شود، به طوری که مقادیر میانگین سالانه انرژی جنبشی در Era5 ($0.117 \text{ m}^2/\text{s}^2$) حدود دو برابر (m^2/s^2) Era-Interim (0.06) برآورد شد. تغییرات فصلی EKE در هر دو مجموعه داده نشان داد که بیشترین فعالیت پیچکی در فصل تابستان (با اوج $0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$ در Era5) و کمترین آن در زمستان رخ می‌دهد. از دیدگاه مکانی، حوضه جنوبی خزر به دلیل حجم آب بیشتر با تأکید بر تغییرات نسبی EKE به عنوان فعال‌ترین منطقه شناسایی شد. هر چند اوج EKE در حوضه شمالی (با اوج $0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$) است اما این حوضه، کمترین تغییرپذیری را به دلیل حجم و عمق آب نشان داد. تحلیل‌ها حاکی از آن است که بهبود وضوح مکانی (از 0.79° به 0.25°) و به‌روزرسانی پارامترهای فیزیکی در Era5 عامل اصلی این تفاوت‌هاست. این یافته‌ها با مطالعات اخیر در دیگر حوضه‌های نیمه‌محصور همخوانی دارد و اهمیت استفاده از جدیدترین نسخه‌های داده‌های بازتخلی در مدل‌سازی‌های اقیانوسی را برجسته می‌سازد. نتایج این تحقیق می‌تواند مبنای ارزشمندی برای مطالعات آینده در زمینه پیش‌بینی جریان‌های دریایی، مدیریت اکوسیستم و پایش آلاینده‌ها در دریای خزر فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: انرژی جنبشی پیچکی، مدل POM، داده‌های Era5، داده‌های Era-Interim، دریای خزر

۱. مقدمه

انرژی جنبشی پیچکی (EKE) به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی فعالیت‌های میان‌مقیاس در دینامیک اقیانوسی، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال انرژی، تنظیم اقلیم منطقه‌ای، چرخه‌های بیژنوشیمیایی و مواد مغذی در سیستم‌های دریایی ایفا می‌کند [۱-۳]. پیشگامان اولیه مانند McWilliams (1985) و Pedlosky (1996) مبانی نظری دینامیک پیچک‌ها را توسعه دادند [۴،۵]. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پیچک‌های میان‌مقیاس با ابعاد ۵۰-۵۰۰ کیلومتر و طول عمر ۱۰-۱۰۰ روز، سهم غالب‌تری در گردش اقیانوسی دارند و حدود ۹۰-۸۰٪ از انرژی جنبشی کل اقیانوس‌ها را به خود اختصاص می‌دهند [۶-۸]. در دهه اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در روش‌های مطالعه پیچک‌ها حاصل شده است. در محیط‌های نیمه‌محصور و محصور مانند دریای خزر، تأثیر مستقیمی بر توزیع آلاینده‌ها، فرآیندهای تولید اولیه و حتی آب و هوای منطقه دارند [۹]. این پیچک‌ها نه تنها بر توزیع دما و شوری تأثیر می‌گذارند، بلکه عامل اصلی پراکنش آلاینده‌های نفتی در خزر نیز محسوب می‌شوند [۱۰]. مطالعات جدید با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (مانند SWOT) نشان داده‌اند که EKE در مناطق ساحلی معمولاً بیشتر از مناطق فراساحلی است [۱۱،۱۲]. مدل‌سازی‌های اخیر تأثیر بهبود وضوح داده‌های جوی بر شبیه‌سازی EKE را تأیید کرده‌اند [۱۳]. مطالعات عصر ماهواره‌ای (۲۰۱۰-۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی نشان دادند که EKE در مناطق غربی اقیانوس‌ها به مراتب بیشتر از مناطق شرقی است [۱۴،۱۵]. اگرچه مشاهدات ماهواره‌ای مانند ارتفاع‌سنجی راداری و داده‌های شناورهای ARGO اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهند اما مدل‌های عددی با وضوح بالا به عنوان ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی و تحلیل این پدیده‌ها ظهور کرده‌اند [۱۶]. در این میان، مدل‌های منطقه‌ای مانند Princeton Ocean Model (POM) با قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای میان‌مقیاس، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند.

در یای خزر به عنوان بزرگترین حوضه آبی محصور در خشکی، از ویژگی‌های هیدرودینامیکی منحصر به فردی

برخوردار است [۱۷،۱۸]. تحقیقات اولیه توسط Kostianoy و Kosarev (2005) الگوی کلی گردش آب در خزر را ترسیم کردند [۱۹]. مطالعه جامع Dyakonov و Ibrayev (۲۰۱۹) با استفاده از مدل‌سازی و داده‌های ماهواره‌ای، توزیع مکانی-زمانی انرژی جنبشی پیچکی (EKE) در خزر را کمی‌سازی نموده و نقش توپوگرافی بستر را در تشکیل پیچک‌ها تأیید کرد [۲۰]. مطالعات میدانی اخیر با استفاده از داده‌های میدانی، وجود پیچک‌های شدید به قطر ۵۰-۱۵۰ کیلومتر در حوضه جنوبی دریای خزر را تأیید کرده‌اند [۲۱]. الگوهای باد سطحی، به‌ویژه در فصول گرم، نقش مهمی در شکل‌گیری جریان‌ها و ناپایداری‌های اقیانوسی دارند [۲۲]. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده‌اند که ناپایداری‌های جریان‌ات مرزی عامل اصلی تشکیل پیچک‌ها در خزر هستند [۱۷]. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که فعالیت پیچک‌ها در این دریا تحت تأثیر مستقیم میدان باد و توپوگرافی بستر قرار دارد [۲۰،۲۱]. با این حال، تاکنون مطالعات محدودی به بررسی سیستماتیک EKE در این منطقه پرداخته‌اند. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که انتخاب داده‌های جوی با وضوح مناسب، تأثیر بسزایی در دقت شبیه‌سازی EKE دارد [۲۳]. مجموعه داده‌های ECMWF به‌ویژه سری Era، از جمله Era-Interim و Era5، به‌طور گسترده در شبیه‌سازی‌های جوی به کار می‌روند. Era-Interim (۱۹۷۹-۲۰۱۹) با قدرتمندی نسبتاً خوب و دقت مکانی 0.79° (≈ 180 نقطه در محدوده مطالعه)، در بسیاری از مطالعات پژوهشی استفاده شده است [۲۴-۲۸]. Era5 به‌عنوان نسل جدیدتر، دقت مکانی را به 0.25° (≈ 1496 نقطه) افزایش داده و بهبودهای قابل توجهی در پارامترهای فیزیکی را فراهم کرده است [۲۹،۳۰]. با این حال، این بهبود با افزایش چشمگیر حجم داده‌ها (≈ ۸ برابر نسبت به Era-Interim) همراه است. استفاده از Era5 به دلیل دقت بالاتر، امکان تحلیل دقیق‌تر پدیده‌های میان‌مقیاس و سینوپتیکی را فراهم می‌کند [۲۹]. در این زمینه، مجموعه داده‌های بازتحلیل ECMWF از نسخه‌ی Era-Interim به Era5 تکامل یافته‌اند که بهبودهای قابل توجهی در پارامترهای جوی به ویژه میدان باد ایجاد کرده‌اند [۳۰]. مطالعه‌ی اخیر، بهبود ۷٪ در شبیه‌سازی دمای سطحی با استفاده از Era5 را نشان داده‌اند

کیلومتر و ۳۵ لایه قائم در دستگاه مختصات سیگما است. معادلات هیدرودینامیکی با روش تفکیک مد یعنی مد خارجی به صورت صریح و مد داخلی به صورت ضمنی حل می‌شوند. داده‌های ورودی شامل باد در ارتفاع ۱۰ متری، بارش، تبخیر و شارهای حرارتی از ECMWF با وضوح 2.5° و نسخه‌های Era-Interim و Era5 و با گام زمانی ۳ ساعته برای دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۹-۲۰۱۸) هستند. داده‌های اولیه دما و شوری از WOA2013 و ژرفاسنجی از GEMCO گرفته شدند. همچنین دبی ورودی رودهای ولگا (با ۵ شاخه)، کورا و اورال از منبع NRL به کار گرفته شد [۳۸].

مدل در دو سناریو (Era-Interim و Era5) به مدت ۱۰ سال (۲۰۰۹-۲۰۱۸) اجرا شد و خروجی‌های روزانه آن در قالب فایل NetCDF ذخیره گردید. برای محاسبه EKE، خروجی سال آخر (۲۰۱۸) تحلیل گردید برای اعتبارسنجی، دمای سطحی خروجی مدل با تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مقاله قبلی نویسندگان مقایسه شد [۲۹]. داده‌های ماهواره‌ای از سایت <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> دانلود و پردازش شدند.

به طور کلی جریان دریایی سطحی دارای دو مولفه شمال سو (v)، شرق سو (u) است که می‌توان بر حسب مقدار میانگین سرعت (\bar{u} , \bar{v}) و انحراف از مقدار میانگین (u' , v') بصورت معادله ۱ نشان داد [۳۹]:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v' \quad (1)$$

میانگین انرژی جنبشی (MKE)، انرژی‌های جنبشی پیچکی (EKE) عبارتند از (معادله ۲ و ۳):

$$MKE = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \quad (2)$$

$$EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \quad (3)$$

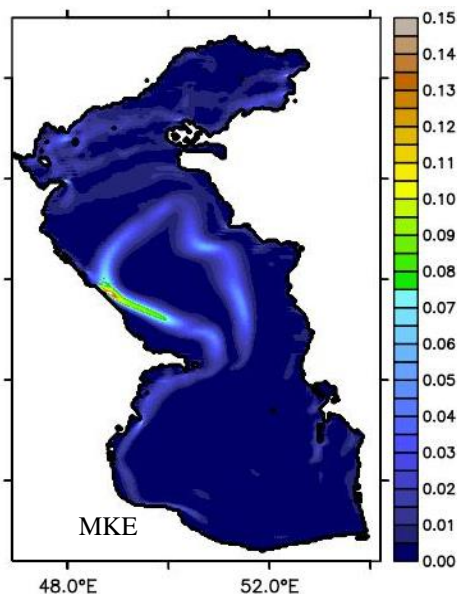
۳. یافته‌ها و بحث

در این پژوهش، داده‌های خروجی مدل مربوط به سال ۲۰۱۸ مورد تحلیل قرار گرفت. پایداری و صحت‌سنجی مدل نیز قبلاً در مطالعه‌ای مبنی بر فراجوشی در دریای خزر انجام شده است و جزئیات مربوط به پیکربندی و

[۲۹]. از شکاف‌های تحقیقاتی در این بخش می‌توان به عدم بررسی سیستماتیک تأثیر وضوح داده‌های جوی بر شبیه‌سازی EKE در محیط‌های نیمه‌محصور و محصور؛ نیاز به ارزیابی کمی بهبود نسخه جدید داده‌های ERA5 (ECMWF نسبت به Era-Interim)؛ کمبود مطالعات جامع درباره تغییرات فصلی EKE در خزر اشاره کرد. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر دو نسخه مختلف (Era-Interim و Era5) داده‌های بازتحلیل ECMWF بر شبیه‌سازی EKE در دریای خزر، از جمله مقایسه کمی عملکرد Era-Interim و Era5 در شبیه‌سازی EKE؛ تحلیل تغییرات فصلی الگوهای EKE در حوضه‌های مختلف خزر انجام شده است. از نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به مواردی از قبیل اولین مطالعه سیستماتیک EKE با استفاده از آخرین نسخه داده‌های ECMWF در خزر؛ ارائه تحلیل کمی از بهبود داده‌های حاصل از Era5 در محیط نیمه‌محصور و محصور اشاره کرد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به درک بهتر دینامیک پیچکی‌ها در حوضه‌های بسته و بهبود مدل‌های پیش‌بینی اقیانوسی کمک شایانی نماید.

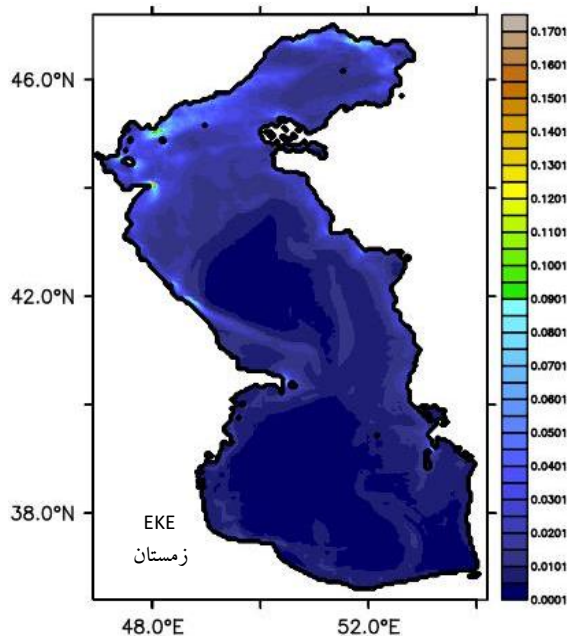
۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش از مدل عددی POM، یکی از مدل‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی اقیانوس‌ها و دریاها استفاده شده است. مدل عددی POM یکی از مدل‌های کلاسیک و پرکاربرد در زمینه مدل‌سازی اقیانوسی و دریایی محسوب می‌شود که توسط پژوهشگران سراسر جهان در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱-۳۴]. این مدل تحت حمایت آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی NOAA و مؤسسه تحلیل دینامیکی پرینستون توسعه یافته است. اولین نسخه از این مدل توسط بلمنبرگ و ملور (۱۹۷۷) با هدف شبیه‌سازی جریان‌های اقیانوسی در حوزه‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی ارائه شد [۳۵]. نسخه به‌روزرسانی شده آن به نام mpiPOM است که توسط مرکز پیش‌بینی پیشرفته اقیانوسی تایوان توسعه یافته و با توجه به ساختار محاسباتی موجود بهینه‌سازی شده است [۳۶]. مدل مورد استفاده، برای دریای خزر در محدوده جغرافیایی 37°N - 47°N و 46°E - 55°E پیکربندی شده است [۳۷، ۳۸]. شبکه محاسباتی دارای وضوح افقی حدود ۳



شکل ۲. تغییرات میانگین سالانه انرژی جنبشی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر با استفاده از داده‌های Era5

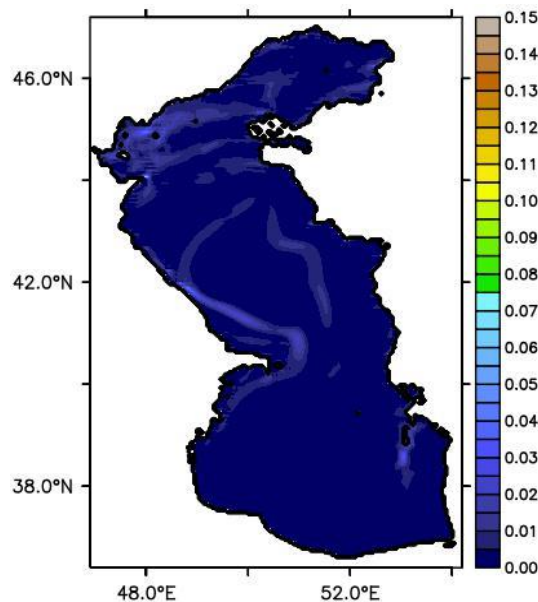
در فصل زمستان، انرژی جنبشی پیچکی در حالت Era5، میزان بیشتری نسبت به Era-Interim نشان می‌دهد (شکل ۳ و ۴).



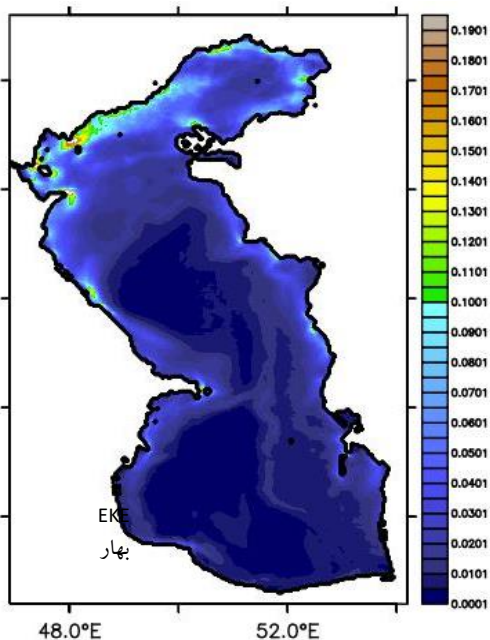
شکل ۳. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در زمستان؛ داده‌های Era-Interim

اعتبارسنجی مدل را می‌توان در پژوهش Fallah و Mansoury (۲۰۲۲) مشاهده کرد [۳۸] و در ادامه مقایسه تغییرات دمای سطح دریای خزر در دو حالت شبیه‌سازی (داده‌های Era5 و Era-Interim) با داده‌های خروجی MODIS نشان داد که داده‌های ERA5 بهبود ۷٪ نسبت به ERA-Interim دارد [۲۹]. اگرچه اعتبارسنجی مستقیم EKE در این مطالعه انجام نشد، اما همپوشانی مکانی حاکی از نقش غیرمستقیم بهبود دقت مدل در شبیه‌سازی پیچک هاست. این ارتباط از آنجا ناشی می‌شود که فراجوشی با ایجاد جریان‌های قائم، گرادیان‌های دمایی و شوری تقویت شده‌ای ایجاد می‌کند که به ناپایداری جریان و تشکیل پیچک‌ها می‌انجامد [۱۶].

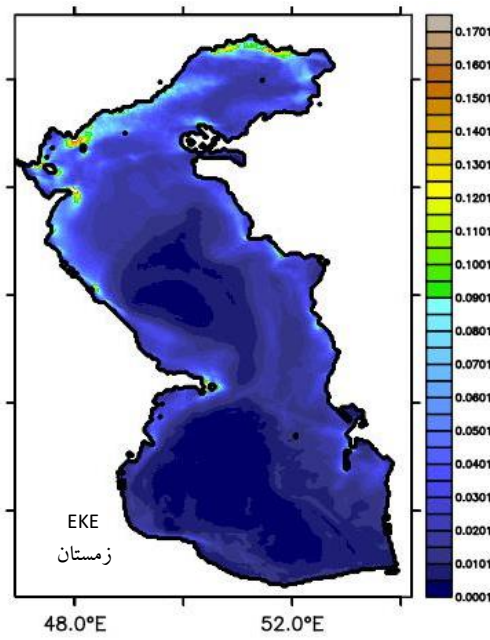
در این بخش، تغییرات میانگین فصلی انرژی جنبشی پیچکی براساس میانگین سالانه انرژی جنبشی در سطح دریا در دو شرایط Era5 و Era-Interim بررسی شده است. اختلاف میانگین سالانه انرژی در حالت‌های Era5 و Era-Interim نشان می‌دهد که جریان‌های دریایی قوی‌تری به ویژه در حوضه میانی وجود دارد. بیشینه انرژی این جریان در دو حالت مذکور (Era5 و Era-Interim) به ترتیب حدود m^2/s^2 ۰/۰۶ و m^2/s^2 ۰/۱۲ است (شکل ۱ و ۲).



شکل ۱. تغییرات میانگین سالانه انرژی جنبشی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر با استفاده از داده‌های Era-Interim



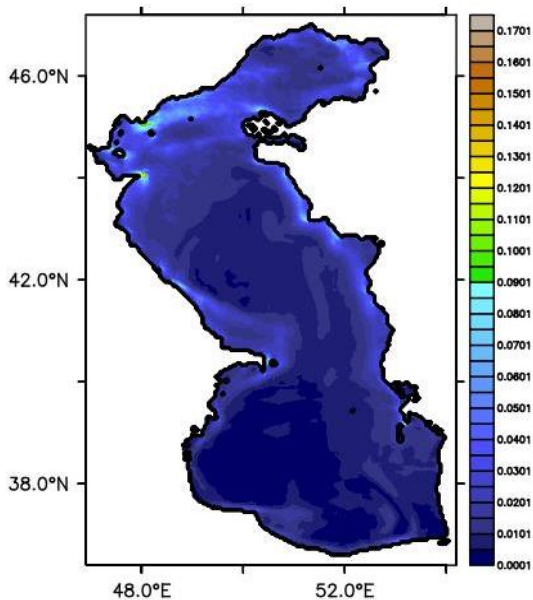
شکل ۶. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در بهار؛ داده‌های Era5



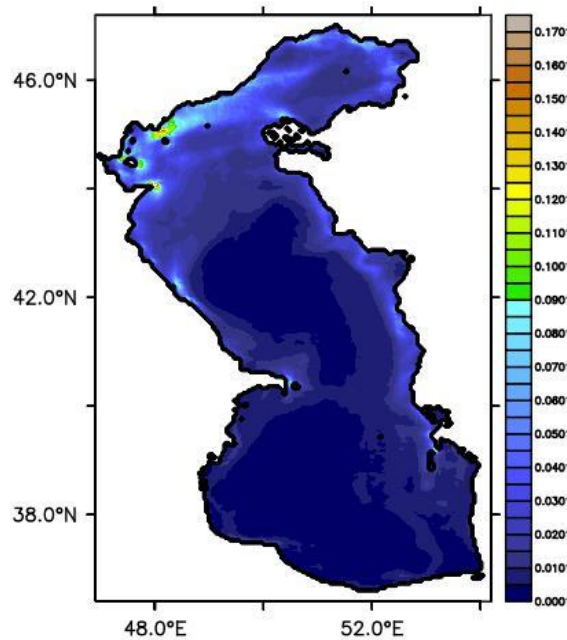
شکل ۴. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در زمستان؛ داده‌های Era5

در فصل تابستان، انرژی بیشتری در حالت Era5 نسبت به Era-Interim در سطح دریای خزر وجود دارد بطوری که بیشترین میزان اختلاف EKE در حوضه‌های شمالی و جنوبی به ویژه نواحی مرزی ساحلی مشاهده می‌شود (شکل ۷ و ۸).

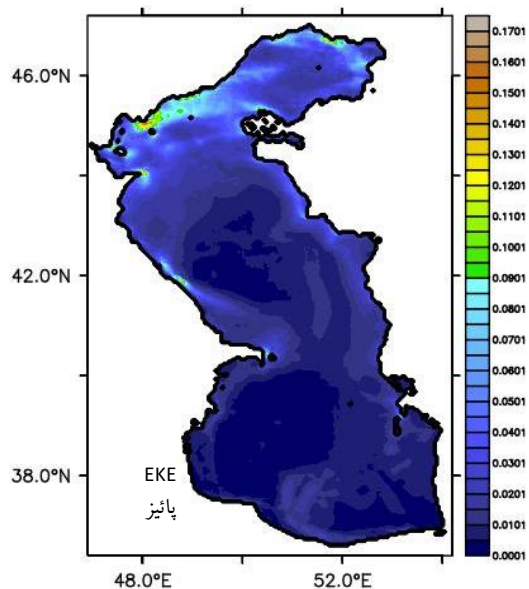
در فصل بهار، اختلاف EKE در دو حالت Era-Interim و Era5 مشهود است هر چند بیشترین تغییرات مربوط به مناطق کم عمق و نواحی مرزی دریای خزر است ولی اختلاف‌های میزان EKE در مناطق عمیق دریای خزر در این دو حالت نیز مشاهده می‌شود (شکل ۵ و ۶).



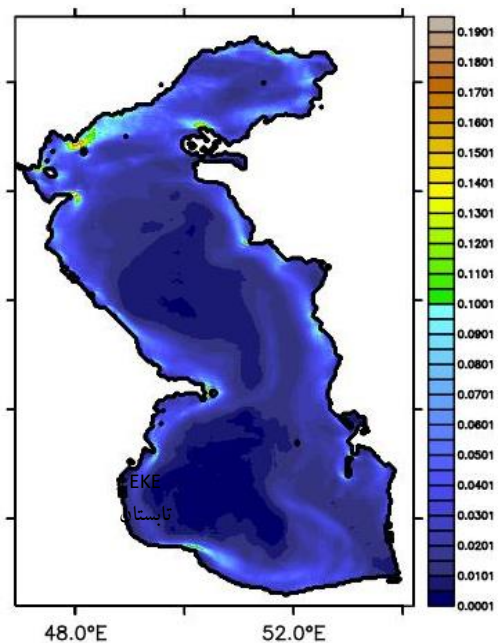
شکل ۷. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در تابستان؛ داده‌های Era-Interim



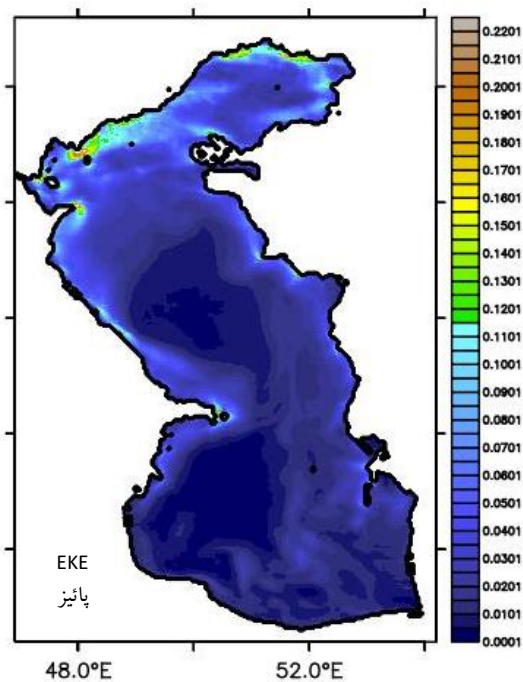
شکل ۵. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در بهار؛ داده‌های Era-Interim



شکل ۹. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در پائیز؛ داده‌های Era-Interim



شکل ۸. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در تابستان؛ داده‌های Era5



شکل ۱۰. تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (m^2/s^2) در سطح دریای خزر در پائیز؛ داده‌های Era5

در فصل پائیز نیز مانند فصول قبل، انرژی پیچکی بیشتری در حالت Era5 نسبت به Era-Interim در سطح دریا وجود دارد. بطوری که این اختلاف در حوضه میانی و جنوبی بیشتر است (شکل ۹ و ۱۰).

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های Era5 منجر به افزایش قابل توجه (حدود ۱۰٪) در مقادیر شبیه‌سازی شده EKE نسبت به Era-Interim می‌شود جزئیات فصلی این افزایش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه میانگین $EKE (m^2/s^2)$ در فصول مختلف

منطقه با بیشترین اختلاف	درصد افزایش	Era5 (m^2/s^2)	Era-Interim (m^2/s^2)	فصل
حوضه میانی	٪۱۰۰	۰/۱۲	۰/۰۶	زمستان
مناطق ساحلی جنوبی	٪۸۰	۰/۰۹	۰/۰۵	بهار
حوضه شمالی	٪۱۱۴	۰/۱۵	۰/۰۷	تابستان
حوضه جنوبی	٪۸۳	۰/۱۱	۰/۰۶	پائیز

تغییرات نسبی EKE در این حوضه معنی‌دارتر است. عمق زیاد و شیب تند بستر، همراه با واداشتهای خارجی، نوسانات را تشدید کرده و تغییرات EKE را بیشتر می‌کند.

۲. اثرات پارامترهای دیگر بر EKE

علاوه بر عمق‌سنجی، پارامترهای جوی و اقیانوسی نقش مکمل دارند:

میدان باد: شکل‌های ۱ و ۲ (MKE سالانه) نشان می‌دهند که بادهای سطحی MKE کلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و (شکل ۵ از مقاله قبلی نویسندگان [۴۰]) ارتباط EKE با تنش رینولدز (RS) را تأیید می‌کند (شکل ۵ از مقاله قبلی نویسندگان [۴۰]). تحلیل الگوهای بادی با استفاده از روش‌های آماری) مانند EOF نشان می‌دهد که بادهای تابستانی، به‌ویژه در حوضه جنوبی، ناپایداری‌های جریان را افزایش داده و EKE را تقویت می‌کنند [۲۲]. تنش چرخشی (wind stress curl) ناشی از این بادهای، به همراه داده‌های Era5، نقش کلیدی در تشدید EKE دارد [۴۱].

ترموکلاین: انحراف از میانگین سرعت جریان در فصول گرم [۴۰] به دلیل ترموکلاین قوی نشان می‌دهند که این پایداری حرارتی، لایه اختلاط را محدود می‌کند اما ناپایداری‌های افقی را افزایش داده و به تشکیل پیچک‌ها کمک می‌کند [۲۰].

توپوگرافی بستر: شیب تند در حوضه جنوبی می‌تواند ناپایداری برشی ایجاد کند و جریان‌ها را به نوسانات بیشتر سوق دهد که در شکل‌های ۷ و ۸ (تابستان) به عنوان تغییرات نسبی بالای EKE مشاهده می‌شود.

یخبندان: در حوضه شمالی، عدم شبیه‌سازی یخ در مدل POM (شکل‌های ۳، ۴، ۹ و ۱۰) باعث خطای بیش‌برآورد EKE در فصول سرد می‌شود که باید در مطالعات آینده با مدل‌های ترکیبی یخ-آب اصلاح گردد.

نقش کلیدی Era5 در آشکارسازی الگوها به صورت زیر مشهود است: (الف) بهبود پارامترسازی باد؛ وضوح مکانی 0.25° در Era5 (نسبت به 0.79° در Era-Interim) سازوکار

تحلیل جامع تغییرات فصلی انرژی جنبشی پیچکی (EKE) در حوضه‌های شمالی، میانی و جنوبی دریای خزر بر اساس یافته‌های جدول ۱ و شکل‌های ۳ تا ۱۰ نشان‌دهنده الگوهای متمایزی در توزیع EKE است که عمدتاً تحت تأثیر عمق‌سنجی (عمق دریا) و پارامترهای فیزیکی دیگر مانند میدان باد، ترموکلاین و یخبندان قرار دارد. این عوامل با هم تعامل کرده و تغییرات مکانی-فصلی EKE را تبیین می‌کنند:

۱. تأثیر عمق‌سنجی بر EKE:

عمق‌سنجی نقش کلیدی در تشکیل و شدت پیچک‌ها ایفا می‌کند، زیرا عمق دریا بر گرادیان فشار، ناپایداری برشی و انتقال انرژی تأثیر می‌گذارد:

حوضه شمالی (میانگین عمق حدود ۵ متر): شکل‌های ۳، ۴، ۹ و ۱۰ (زمستان و پاییز)، مقادیر بالایی از EKE (مثلاً m^2/s^2) در زمستان با داده‌های Era5 را نشان می‌دهند، اما این مقادیر به دلیل یخبندان کامل و عدم جریان سطحی واقعی نامعتبر هستند. مدل POM بدون لینک با مدل یخ، این منطقه را به عنوان آب مایع شبیه‌سازی می‌کند که منجر به خطای بیش‌برآورد EKE می‌شود. در فصول گرم (بهار و تابستان، شکل‌های ۵ تا ۸)، EKE در این حوضه کم (حدود m^2/s^2) است، که با ورودی رود ولگا و عمق کم و محدودیت فیزیکی برای توسعه پیچک‌های انرژی‌دار همخوانی دارد.

حوضه میانی: جدول ۱ نشان می‌دهد که در زمستان، EKE با Era5 به $0.12 m^2/s^2$ می‌رسد (افزایش ۱۰۰٪ نسبت به Era-Interim)، که با شکل‌های ۳ و ۴ تأیید می‌شود. عمق میانی و گرادیان فشار افقی/عمودی در این حوضه، ناپایداری جریان را افزایش می‌دهد و EKE را در فصول سرد تقویت می‌کند.

حوضه جنوبی: شکل‌های ۷ و ۸ (تابستان) اوج مطلق EKE را در حوضه شمالی ($0.15 m^2/s^2$ با Era5) نشان می‌دهند، که با جدول ۱ (افزایش ۱۱۴٪ نسبت به $0.07 m^2/s^2$ در Era-Interim) همخوانی دارد. با این حال، با توجه به حجم آب بیشتر در حوضه جنوبی (۳۵٪ مساحت، ۶۴٪ حجم)، بیشترین

(۱) تأثیر عمق آب: حوضه شمالی با عمق متوسط حدود ۵ متر، ظرفیت محدودی برای توسعه پیچک‌های انرژی‌دار دارد. همچنین یخبندان زمستانی [۱۷] ناپایداری جریان را کاهش می‌دهد.

(۲) نقش توپوگرافی بستر: شیب تند حوضه جنوبی با ایجاد ناپایداری برشی، تشکیل پیچک‌های قوی‌تر را تسهیل می‌کند [۲۰].

(۳) میدان باد: همبستگی بین بیشینه‌ی EKE در تابستان و تشدید بادهای در حوضه جنوبی مشهود است این بادهای با ایجاد تنش چرخشی (wind stress curl)، انتقال انرژی به لایه‌های زیرین را افزایش می‌دهند [۱۷].

به‌طور خاص، بهبود ۱۰٪ EKE در سناریوی Era5 ناشی از توانایی این مجموعه داده در بازنمایی بهتر این عوامل طبیعی است از جمله: وضوح بالاتر (0.25°) در ثبت گرادیان‌های مکانی باد ساحلی؛ پارامترسازی بهبودیافته تنش سطحی [۳۰] و نمایش واقع‌بینانه‌تر اثر توپوگرافی بر دینامیک باد (شیب‌دار شدن جریان بر فراز البرز). یافته‌های تحقیق حاضر تأیید می‌کنند که بهبودهای Era5 نه تنها در شبیه‌سازی دما [۲۹] با بهبودهای EKE نیز همراه بوده است همچنین نتایج این تحقیق با مطالعات Stanichny و Kubryakov (۲۰۱۵) در دریای سیاه که بهبود ۸۵٪ را گزارش کرده‌اند، قابل مقایسه است [۴۵].

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از مدل عددی POM و دو مجموعه داده Era-Interim و Era5 به بررسی تغییرات انرژی جنبشی پیچکی (EKE) در دریای خزر پرداخته است. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق:

- (۱) برتری واضح Era5 از جمله افزایش ۱۰٪ در مقادیر EKE نسبت به Era-Interim؛ بهبود قابل توجه در شبیه‌سازی ساختارهای پیچکی و نمایش واقع‌بینانه‌تر تغییرات فصلی.
- (۲) الگوهای مکانی-زمانی از جمله: بیشینه EKE در حوضه شمالی در تابستان ($0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$) است در حالی که تغییرات

بادها را دقیق‌تر شبیه‌سازی می‌کند [۹، ۴۲]. (ب) ثبت پدیده‌های میان‌مقیاس؛ توانایی ثبت گردابه‌های بادی با قطر > 30 کیلومتر که در تشکیل پیچک‌ها مؤثرند. (ج) همبستگی نسبتاً قوی بین بهبود شبیه‌سازی میدان باد و افزایش دقت EKE، اهمیت به‌روزرسانی داده‌ها را تأیید می‌کند. این یافته‌ها با نتایج Ibrayev و همکاران (۲۰۱۰) در دریای خزر [۱۷] و همچنین Jordi و Wang (۲۰۰۹) در دریای مدیترانه که بهبود ۹۰-۱۱۰٪ را گزارش کرده‌اند [۴۳]، همخوانی دارد. افزایش انرژی مشاهده شده عمدتاً ناشی از عوامل مختلفی است از جمله: ۱- بهبود در وضوح میدان باد؛ Era5 با وضوح 0.25° نسبت به Era-Interim (0.79°) می‌تواند ساختارهای کوچک‌مقیاس باد را بهتر نمایندگی کند [۴۲]. ۲- به‌روزرسانی پارامترهای فیزیکی؛ نسخه جدیدتر از پارامترسازی بهبودیافته‌ای برای تنش سطحی استفاده می‌کند [۴۲]. در حوضه جنوبی دریای خزر، بیشترین افزایش EKE در تابستان (تا $0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$) ناشی از تأثیر (بهبود یافته) میدان باد بر جریان‌های ساحلی است و می‌تواند پیامدهای اکولوژیک از جمله افزایش اختلاط قائم و انتقال مواد مغزی به‌مراه داشته باشد که با نتایج Kubryakov و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد [۹]. در حوضه میانی دریای خزر، الگوی گردش پادساعتگرد واضح‌تری در حالت Era5 رخ می‌دهد که همخوانی خوبی با مشاهدات میدانی جدید دارد [۴۲]. چرخش پادساعتگرد در حوضه میانی که توسط ویژگی‌های ژرفاسنجی هدایت می‌شود، کانون‌های پایدار پیچک را در امتداد کرانه‌های غربی ایجاد می‌کند؛ به‌طوری که پیچک‌ها به سمت شرق و درون حوضه جنوبی گسترش می‌یابند. شبیه‌سازی‌های عددی در حوضه‌های دریای خزر و همچنین مطالعات میدانی در منطقه‌ی کیش‌شهر این رفتار را تأیید می‌کنند [۲۱، ۴۴]. در حوضه شمالی خزر کمترین بهبود در شبیه‌سازی جریان (حدود ۶۰٪) مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عمق کم و یخبندان بودن این منطقه در فصول سرد و تأثیر محدود وضوح داده‌ها باشد. این الگوهای مکانی-فصلی را می‌توان با ویژگی‌های طبیعی دریای خزر تبیین کرد:

انجام شده است؛ بدین وسیله نویسندگان از مسئولان محترم کمال قدردانی و تشکر را دارند.

مراجع

- [1] Chelton DB, Schlax MG, Samelson RM. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*. 2011 Oct 1;91(2):167-216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
- [2] Mensa JA, Timmermans ML, Kozlov IE, Williams WJ, Özgökmen TM. Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018 Apr;123(4):2635-45. <https://doi.org/10.1002/2017JC013728>
- [3] Zhang JB, Liu YS, Foley SF, Moynier F, Zhao L, Xu R, Wang CY. Widespread two-layered melt structure in the asthenosphere. *Nature Geoscience*. 2024 May;17(5):472-7. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01433-1>
- [4] McWilliams JC. Submesoscale, coherent vortices in the ocean. *Reviews of Geophysics*. 1985 May;23(2):165-82.
- [5] Pedloski J. *Ocean circulation theory*. Springer Science & Business Media; 1996.
- [6] Dong J, Fox-Kemper B, Jing Z, Yang Q, Tian J, Dong C. Turbulent dissipation in the surface mixed layer of an anticyclonic mesoscale eddy in the South China Sea. *Geophysical Research Letters*. 2022 Aug 28;49(16): e2022GL100016. <https://doi.org/10.1029/2022GL100016>
- [7] Qiu Z, Lan J, Wei Z, Xu T. Changes in spreading of Southeast Indian subantarctic mode water during Argo period. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2024 Jun;129(6): e2024JC020980. <https://doi.org/10.1029/2024JC020980>
- [8] Ivanov V, Gusev A, Diansky N, Sukhonos P. Modelled response of Arctic and North Atlantic thermohaline structure and circulation to the prolonged unidirectional atmospheric forcing over the Arctic Ocean. *Climate Dynamics*. 2024 Jul;62(7):6841-60. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07239-6>
- [9] Kubryakov A, Aleskerova A, Plotnikov E, Mazyuk A, Medvedeva A, Stanichny S. Accumulation and cross-shelf transport of coastal waters by submesoscale cyclones in the Black Sea. *Remote Sensing*. 2023 Sep 6;15(18):4386. <https://doi.org/10.3390/rs15184386>
- [10] Kostianoy AG, Lavrova OY. Satellite instrumentation and technique for oil pollution monitoring of the seas. In *Instrumentation and*

نسبی EKE در حوضه جنوبی به دلیل حجم و عمق بیشتر، معنی دارتر می‌باشد؛ الگوی فصلی مشخص با اوج فعالیت در تابستان و ارتباط مستقیم بین بهبودهای میدان باد و افزایش EKE.

(۳) ارزیابی کمی بهبودهای Era5 و شناسایی مناطق پر انرژی و بهینه‌سازی پارامترها، درک بهتری از دینامیک خزر و افزایش دقت شبیه‌سازی فراهم می‌کند. این مطالعه نشان داد که استفاده از داده‌های بازتحلیل با وضوح بالا (Era5) می‌تواند تحول چشمگیری در درک ما از دینامیک پیچکی دریای خزر ایجاد کند. یافته‌ها نه تنها از دیدگاه علمی حائز اهمیت هستند، بلکه کاربردهای عملی مهمی در مدیریت محیط زیست دریایی (پیش‌بینی بهتر پراکنش آلاینده‌های نفتی و ارزیابی اثرات پیچک‌ها بر اکوسیستم) و فعالیت‌های اقتصادی از جمله صنعت شیلات (شناسایی مناطق مستعد تغذیه‌ای؛ پیش‌بینی مناطق تجمع آبزیان) و همچنین هشدارهای دریایی (بهبود پیش‌بینی جریان‌های خطرناک؛ افزایش ایمنی ناوبری) دارند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که به‌روزرسانی داده‌های جوی می‌تواند تأثیر چشمگیری بر شبیه‌سازی دینامیک پیچکی در محیط‌های نیمه‌محصور و محصور داشته باشد. بهبودهای مشاهده شده در EKE به‌ویژه در حوضه‌های جنوبی و میانی دریای خزر، اهمیت استفاده از جدیدترین نسخه‌های داده‌های بازتحلیل را در مدل‌سازی‌های اقیانوسی برجسته می‌سازد.

محدودیت‌ها

یکی از محدودیت‌های اصلی این مطالعه، عدم شبیه‌سازی یخبندان توی مدل POM توی حوضه شمالی است که باعث نامعتبر بودن مقادیر EKE در فصول سرد (بخشی از شکل‌های ۳، ۴، ۹ و ۱۰) می‌شود. این کاستی پیشنهاد استفاده از مدل‌های ترکیبی یخ-آب را در تحقیقات آینده ضروری می‌کند.

سپاسگزاری

این تحقیق در آزمایشگاه دینامیک شاره‌های ژئوفیزیکی دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس

- [20] Dyakonov GS, Ibrayev RA. Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model. *Ocean Science*. 2019 May 16;15(3):527-41. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
- [21] Azizpour J, Hamzehpoor A, Rahnema R. (). Study of southern Caspian Eddies, case study: Off Kiashahr. *Journal Of Marine Engineering*. 2022;18(35):27-34. <https://marine-eng.ir/article-1-939-en.html>
- [22] Farjami H, Hesari AR. Assessment of sea surface wind field pattern over the Caspian Sea using EOF analysis. *Regional Studies in Marine Science*. 2020 Mar 1; 35:101254. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101254>
- [23] Small RD, deSzoek SP, Xie SP, O'neill L, Seo H, Song Q, Cornillon P, Spall M, Minobe S. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2008 Aug 1;45(3-4):274-319. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>
- [24] Luo H, Ge F, Yang K, Zhu S, Peng T, Cai W, Liu X, Tang W. Assessment of ECMWF reanalysis data in complex terrain: Can the CERA-20C and ERA-Interim data sets replicate the variation in surface air temperatures over Sichuan, China? *International Journal of Climatology*. 2019 Dec;39(15):5619-34. <https://doi.org/10.1002/joc.6175>
- [25] Aparecido LE, Rolim GD, Moraes JR, Torsoni GB, Meneses KC, Costa CT. Accuracy of ECMWF Era-Interim reanalysis and its application in the estimation of the water deficiency in Paraná, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2020 Jan 24; 34:515-28. <https://doi.org/10.1590/0102-7786344066>
- [26] Elkut AE, Taha MT, Zed AB, Eid FM, Abdallah AM. Wind-wave hindcast using modified ECMWF ERA-Interim wind field in the Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021 May 5; 252:107267. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107267>
- [۲۷] زرشکیان سجاد، منصورى داریوش. ارزیابی انرژی گرمایی اقیانوسی جهت تأمین انرژی الکتریکی سکوهای نفت و گاز فراساحلی دریای خزر. *فیزیک زمین و فضا*. ۱۳۹۹؛ ۴۶(۲):۳۳۱-۳۴۵. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.289441.1007161>
- [28] Fallah F, Mansoury D. Temperature structure and wind-induced water level anomalies in the Caspian Sea: a study on coastal upwelling. *Reg Stud Mar Sci*. 2023; 62:102975. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102975>
- Measurement Technologies for Water Cycle Management 2022 Nov 23 (pp. 53-77). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_4
- [11] Archer M, Wang J, Klein P, Dibarbouré G, Fu LL. Wide-swath satellite altimetry unveils global submesoscale ocean dynamics. *Nature*. 2025 Apr 17;640(8059):691-6. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08722-8>
- [12] Arur A, Krishnan P, George G, Goutham Bharathi MP, Kaliyamoorthy M, Hareef Baba Shaeb K, et al. The influence of mesoscale eddies on a commercial fishery in the coastal waters of the Andaman and Nicobar Islands, India. *Int J Remote Sens*. 2014;35(17):6418-6443. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.958246>
- [13] Wedi NP, Polichtchouk I, Dueben P, Anantharaj VG, Bauer P, Boussetta S, Browne P, Deconinck W, Gaudin W, Hadade I, Hatfield S. A baseline for global weather and climate simulations at 1 km resolution. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020 Nov;12(11):e2020MS002192. <https://doi.org/10.1029/2020MS002192>
- [14] Jia F, Wu L, Qiu B. Seasonal modulation of eddy kinetic energy and its formation mechanism in the southeast Indian Ocean. *Journal of Physical Oceanography*. 2011 Apr;41(4):657-65. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4436.1>
- [15] Chelton DB, Schlax MG, Samelson RM. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*. 2011 Oct 1;91(2):167-216. <https://doi.org/10.1016/j.poccean.2011.01.002>
- [16] Capet X, McWilliams JC, Molemaker MJ, Shchepetkin AF. Mesoscale to submesoscale transition in the California Current System. Part I: Flow structure, eddy flux, and observational tests. *Journal of physical oceanography*. 2008 Jan;38(1):29-43. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3671.1>
- [17] Ibrayev RA, Özsoy E, Schrum C, Sur HI. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science*. 2010 Mar 3;6(1):311-29. <https://doi.org/10.5194/os-6-311-2010>
- [۱۸] کیمیجانی. طبقه‌بندی هیدرودینامیکی سواحل جنوبی دریای خزر-استان مازندران. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی دریا. ۱۳۹۵؛ ۱۲(۲۴):۵۳-۶۴.
- [19] Kostianoy AG, Kosarev AN, editors. *The Caspian Sea environment*. Springer Science & Business Media; 2005.

- 1;64(2):363-75.
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.003>
- [39] Vosoughi M, Mansoury D. Temporal distribution of sea current's kinetic energy in the middle Caspian basin, *Regional Studies in Marine Science*. 2024;9(3): 537-546.
- [40] Zhan P, Subramanian AC, Yao F, Hoteit I. Eddies in the Red Sea: A statistical and dynamical study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014 Jun;119(6):3909-25. <https://doi.org/10.1002/2013JC009563>
- [41] Frenger I, Gruber N, Knutti R, Münnich M. Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall. *Nature geoscience*. 2013 Aug;6(8):608-12. <https://doi.org/10.1038/ngeo1863>
- [42] Beljaars A, Balsamo G, Bechtold P, Bozzo A, Forbes R, Hogan RJ, Köhler M, Morcrette JJ, Tompkins AM, Viterbo P, Wedi N. The numerics of physical parametrization in the ECMWF model. *Frontiers in Earth Science*. 2018 Sep 19; 6:137. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00137>
- [43] Jordi A, Wang DP. Mean dynamic topography and eddy kinetic energy in the Mediterranean Sea: Comparison between altimetry and a 1/16-degree ocean circulation model. *Ocean Modelling*. 2009 Jan 1;29(2):137-46. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.04.001>
- [44] Rahnama A, Aliakbari-Bidokhti AA, & Babagoli Matikolaei J. Some physical properties of mesoscale eddies in the Caspian Sea basins based on numerical simulations. *Journal of the Earth and Space Physics*. 2022;47(4):219-230. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.318928.1007290>
- [45] Kubryakov AA, Stanichny SV. Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data. *Oceanology*. 2015 Feb;55(1):56-67. <https://doi.org/10.1134/S0001437015010105>
- [۲۹] وثوقی منیژه، منصوری داریوش، علی اکبری بیدختی عباسعلی. تاثیر جدیدترین داده‌های بازتحلیل مدل ECMWF بر تغییرات دمای سطحی آب دریای خزر. *هیدروفیزیک*. ۱۴۰۰؛ ۷(۲)، ۶۷-۷۸.
- [30] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*. 2020 Jul;146(730):1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [31] Kowalewski M. A three-dimensional hydrodynamic model of the Gulf of Gdańsk. *Oceanological Studies*. 1997;26(4): 77-98. <http://model.ocean.univ.gda.pl/description/Papers/Kowalewski1997.pdf>
- [32] Huang A, Rao YR, Lu Y, Zhao J. Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010 Dec;115(C12). <https://doi.org/10.1029/2010JC006269>.
- [33] Alaka Jr GJ, Sheinin D, Thomas B, Gramer L, Zhang Z, Liu B, Kim HS, Mehra A. A hydrodynamical atmosphere/ocean coupled modeling system for multiple tropical cyclones. *Atmosphere*. 2020 Aug 16;11(8):869.
- [34] He W, Jiang A, Zhang J, Xu H, Xiao Y, Chen S, Yu X. Comprehensive hydrodynamic fitness of an estuary channel and the effects of a water diversion inflow. *Estuaries and Coasts*. 2022 Mar;45(2):382-92. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-00981-8>
- [35] Blumberg AF, Mellor GL. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-dimensional coastal ocean models*. 1987 Jan 1; 4:1-6. <https://doi.org/10.1029/CO004p0001>
- [36] Oey L, Chang YL, Lin YC, Chang MC, Xu F, Lu HF. ATOP-The Advanced Taiwan Ocean Prediction System Based on the mpiPOM. Part 1: Model Descriptions, Analyses and Results. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*. 2013 Feb 1;24(1):137-158. [https://doi.org/10.3319/TAO.2012.09.12.01\(Oc\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2012.09.12.01(Oc))
- [۳۷] منصوری داریوش، صدری نسب مسعود، اکبری نسب محمد. مدل سازی ساختار میدان‌های دما و شوری آب دریای خزر با استفاده از مدل POM. *نشریه هیدرو فیزیک*. ۱۳۹۴؛ ۱(۱):۱-۱۳.
- [38] Fallah F, Mansoury D. Coastal upwelling by wind-driven forcing in the Caspian Sea: A numerical analysis. *Oceanologia*. 2022 Apr

پی‌نوشت‌ها

1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
2. Era (ECMWF Reanalysis)
3. Era-Intrim
4. Era5
5. Caspian Sea
6. Princeton Ocean Model
7. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
8. message passing interface Princeton Ocean Model (mpiPOM)
9. Naval Research Laboratory (NRL)