

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.6.9

درصد همانندی: ۱۲٪

## تأثیر جدیدترین داده‌های بازتحلیل مدل ECMWF بر تغییرات دمای سطحی آب دریای خزر

منیژه وثوقی<sup>۱</sup>، داریوش منصوری<sup>۲\*</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۳</sup>

manijehvosoughi58@gmail.com

mansoury@modares.ac.ir

bidokhti@ut.ac.ir

<sup>۱</sup> دانشجوی اقیانوس‌شناسی فیزیکی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

<sup>۳</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

### چکیده

در برخی تحقیقات پیشین مربوط به مدل‌سازی‌های هیدرودینامیکی دریاها و اقیانوس‌ها، از داده‌های ارا- اینتریم (ERA-Interim) استفاده شده که با توجه به داده‌های بازتحلیل جدیدتر، ارا-۵ (ERA5)، میزان اختلاف دو داده بازتحلیل اخیر (ارا-اینتریم و ارا-۵) و نیز میزان تأثیر آن‌ها برای تعیین پارامترهای فیزیکی دریا (خروجی مدل) اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق، تغییرات دمای توده آب سطحی دریای خزر با استفاده از یک مدل عددی هیدرودینامیک سه‌بعدی توسعه داده شده و بر اساس جدیدترین داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی بررسی شد. در این مدل از داده‌های باد و شارش‌های جوی با وضوح مکانی  $0.25^\circ$  و با گام زمانی ۶ ساعته از بانک داده‌های روزانه ECMWF با داده‌های بازتحلیل ارا-۵ و ارا-اینتریم استفاده شده است. مدل برای مدت ۱۰ سال (۲۰۰۹-۲۰۱۸)، برای هر یک از داده‌های بازتحلیل (ارا-اینتریم و ارا-۵)، به‌طور مجزا پیاده‌سازی و اجرا شد. با مقایسه دماهای سطحی دریای خزر مستخرج از خروجی‌های مدل و تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های بازتحلیل ارا-۵ تطابق بیشتری نسبت به ارا-اینتریم دارند، یافته‌ها نشان می‌دهند اختلاف تغییرات زمانی و مکانی دمای سطحی دریای خزر در دو حالت ارا-۵ و ارا-اینتریم در حوضه شمالی ناچیز و در حوضه میانی نسبتاً محسوس و در حوضه جنوبی معنی‌دار است؛ به‌طوری‌که داده‌های ارا-۵ باعث بهبود نتایج میانگین دمای سالانه خروجی مدل به میزان حدود ۷٪ در حوضه جنوبی دریای خزر شده است.

واژه‌های کلیدی: دمای سطحی دریا؛ ERA-Interim؛ ERA5؛ مدل POM؛ دریای خزر

## ۱. مقدمه

مجموعه داده‌های هواشناسی ارائه شده توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی<sup>۱</sup> (ECMWF) از جمله داده‌هایی است که اغلب برای شبیه‌سازی انتقال لاگراژی استفاده می‌شود. ارا<sup>۲</sup>، یکی از پرکاربردترین محصولات بارشی است که در طول زمان از ارا-۴۰<sup>۳</sup> به ارا-۲۰CM<sup>۴</sup>، ارا-۲۰C<sup>۵</sup>، ارا-اینتریم<sup>۶</sup> و ارا-۵<sup>۷</sup> تبدیل شد. پروژه ارا-اینتریم توسط ECMWF برای تهیه یک تحلیل مجدد جوی جدید برای جایگزینی ارا-۴۰ انجام شد که تا اوایل قرن بیستم گسترش یافت [۱]. ارا-اینتریم دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۹ را پوشش می‌دهد و داده‌های شبکه‌بندی شده آن شامل طیف گسترده‌ای از پارامترهای سطحی توصیف آب‌وهوا، امواج اقیانوس و شرایط سطحی زمین با گام زمانی ۳ ساعته و پارامترهای جو فوقانی (تروپوسفر و استراتوسفر) با گام زمانی ۶ ساعته است. وضوح مکانی این مجموعه داده ۷۹ کیلومتر است. در سال ۲۰۰۶، این مرکز (ECMWF) بازتحلیل ارا-اینتریم را اجرا کرد که از آن زمان تاکنون با موفقیت در هزاران برنامه تحقیقاتی به کار گرفته شده است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. حدود یک دهه بعد، جانشین ارا-اینتریم، یعنی نسل پنجم به نام بازتحلیل ارا-۵ به اجرا در آمد [۹]. ارا-۵، جدیدترین محصول بازتحلیل ECMWF، یک رکورد دقیق از جو جهانی، سطح زمین و امواج اقیانوس از سال ۱۹۵۰ به بعد ارائه می‌دهد. ارا-۵ که برای جایگزینی ارا-اینتریم توسعه یافته است، وضوح مکانی تحلیل مجدد ECMWF را به‌طور قابل‌توجهی به ۳۱ کیلومتر افزایش داده است [۱۰]. علاوه بر این، به نظر می‌رسد که نمایش فرایندهای تروپوسفر به‌طور قابل‌توجهی در ارا-۵ بهبود یافته است، زیرا از یک دهه تحقیق و توسعه در مدل‌سازی دینامیک فیزیکی و تکنیک‌های شبیه‌سازی داده‌ها سود می‌برد؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که ارا-۵ عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به محصولات قبلی

ECMWF داشته باشد [۱۱]. با این حال، استفاده از داده‌های بازتحلیل ارا-۵ با وضوح کامل مکانی و زمانی با افزایش قابل‌توجهی در حجم محاسباتی و ذخیره‌سازی همراه است؛ بنابراین داده‌های بازتحلیل ارا-۵ علی‌رغم پیشرفت‌های متعددی که داشته، همچنان چالش "داده بزرگ" را به‌همراه دارد به‌طوری‌که در مقایسه با ارا-اینتریم که یک دهه پیش توسط مرکز اروپایی معرفی شده، میزان ذخیره داده برای بازتحلیل ارا-۵ حدود ۸۰ بار بیشتر است [۱۱]. داده‌های جدید بازتحلیل ارا-۵ تأثیر قابل‌توجهی بر شبیه‌سازی‌ها دارند. بخشی از تفاوت‌های بین بازتحلیل ارا-۵ و ارا-اینتریم به وضوح مکانی و زمانی بهتر داده‌های بازتحلیل ارا-۵ نسبت داده می‌شود که امکان نمایش بهتر فرارانه‌های همرفتی، امواج گرانشی، چرخندهای استوایی و سایر ویژگی‌های میان‌مقیاس تا بزرگ‌مقیاس (سینوپتیکی یا همدیدی) جو را فراهم می‌کند. اگر وضوح داده‌های ارا-۵ به میزان وضوح ارا-اینتریم کاهش داده شود، تفاوت‌های قابل‌توجهی در شبیه‌سازی انتقال دیده می‌شود که خود موجب تغییرات قابل‌توجهی در مدل پیش‌بینی، مشاهدات و سیستم همگون‌سازی بازتحلیل ارا-۵ و بهبود وضوح می‌شود [۱۲]. منطقه تحقیق، دریای خزر<sup>۸</sup>، بزرگ‌ترین حوضه دریایی بسته جهان است که داخل قاره اوراسیا قرار گرفته است [۱۳]. تراز میانگین، حدود ۲۷ متر پایین‌تر از میانگین تراز دریاهای آزاد است. عمق متوسط حدود ۲۱۰ متر است، بیشترین عمق دریا ۱۰۲۵ متر است [۱۴]. با توجه به شرایط فیزیکی و جغرافیایی و توپوگرافی بستر، دریای خزر را می‌توان به سه بخش داخلی؛ خزر شمالی<sup>۹</sup>، خزر میانی<sup>۱۰</sup> و خزر جنوبی<sup>۱۱</sup> تقسیم کرد [۱۵]. با توجه به محصور بودن دریای خزر، نیروی جزر و مدی در آن بسیار کم و در محدوده چند سانتی‌متری است [۱۶]؛ بنابراین تأثیر قابل‌توجهی در گردش آب این دریا ندارد و تغییرات گردش دریای خزر

## ۲. مواد و روش‌ها

مدل عددی POM مدل معتبر و شناخته‌شده‌ای در مدل‌سازی اقیانوس‌ها و دریاهاست. از این مدل پژوهش‌گران زیادی در اقصی نقاط جهان در زمینه مدل‌سازی در اقیانوس‌ها و دریاها استفاده کرده‌اند [۱۹-۲۲]. مدل POM مورد حمایت آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی<sup>۱۳</sup> متعلق به سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا<sup>۱۴</sup> و مؤسسه تحلیل دینامیکی پرینستون<sup>۱۵</sup> تکامل یافته است. نخستین بار بلمبرگ<sup>۱۶</sup> و ملور<sup>۱۷</sup> (۱۹۷۷) در راستای اهداف اقیانوسی و هواشناسی برای شبیه‌سازی عددی اقیانوس‌ها اولین نسخه مدل POM را ارائه دادند [۲۳]. مدلی با آرایه قائم سیگما، شبکه افقی خمیده قائم، با شرایط مرزی سطح آزاد و بازیرمدل‌های تلاطم و موج است. برای گسسته‌سازی مکانی در مدل POM از شبکه‌بندی متعامد منحنی الخط آرکواوسی<sup>۱۸</sup> در سطح افق و شبکه‌بندی مختصات سیگما در جهت قائم استفاده می‌شود. برای محاسبه ضرایب انتشار قائم نیز از مدل بستر تلاطم مرتبه دوم استفاده می‌شود (مدل ملور- یامادا<sup>۱۹</sup>). فن عددی حل پخش زمانی معادلات بر اساس روش تفکیک مد است که در آن معادلات مد خارجی به صورت صریح و معادلات مد درونی به صورت ضمنی حل می‌شوند. mpiPOM<sup>۲۰</sup> نسخه جدیدی از POM است که برای مدل‌سازی در این تحقیق استفاده شد. mpiPOM توسط مرکز پیش‌بینی پیشرفته اقیانوسی تایوان<sup>۲۱</sup> تهیه و ارائه شده است که برای نیازها و منابع موجود در سامانه آن مرکز بهینه شده است [۲۴].

در این تحقیق، از مدل اقیانوسی POM و نسخه mpiPOM که برای دریای خزر پیکربندی شده [۲۵ و ۲۶]، استفاده شد. دامنه مدل شامل حوضه‌های دریای خزر،  $36^{\circ}N - 47^{\circ}N$  و  $55^{\circ}E - 46/5^{\circ}E$  است که با وضوح افقی حدود ۳ کیلومتر و ۳۵ لایه در مختصات سیگما قائم پیاده‌سازی و برای حل معادلات هیدرودینامیک حاکم در محیط‌های فشارگرا و چگال‌گرا، برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات رایانه‌ای، معادلات انتگرال‌گیری شده در جهت قائم (مد خروجی)، از معادلات ساختار قائم (مد درونی)، جداسازی می‌شوند. این روش تفکیک مد نامیده می‌شود. با توجه به راهنمای مدل mpiPOM

تحت تأثیر عوامل دیگر و به‌ویژه باد هستند، به‌طوری که گردش پادساعتگرد توده آب در حوضه میانی شامل جریان‌های مرزی غربی و شرقی به‌ترتیب نسبتاً قوی و ضعیف هستند [۱۷]. طی سال‌های اخیر در مدل‌سازی‌های هیدرودینامیکی دریاها و اقیانوس‌ها، از داده‌های ارا-اینتریم استفاده شده است که با توجه به داده‌های بازتحلیل جدیدتر (ارا-۵)، میزان اختلاف دو داده بازتحلیل اخیر (ارا-اینتریم و ارا-۵) و میزان تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی دریا (خروجی مدل) می‌تواند مورد پرسش قرار گیرد. برای مثال، تغییرات عمده پارامترهای فیزیکی دریای خزر، به دلیل ناچیز بودن پدیده کشند، در لایه‌های فوقانی توده‌های آب دریا، ناشی از میدان باد رخ می‌دهند که این تغییرات می‌تواند ناشی از اندازه سرعت و جهت باد در هر یک از حالت‌های ارا-اینتریم و ارا-۵ باشد. هرچند گاهی اوقات، علی‌رغم وضوح مکانی و زمانی بهتر داده‌های بازتحلیل ارا-۵ نسبت به ارا-اینتریم، استفاده از مجموعه داده ارا-۵ بهبود چندانی نسبت به ارا-اینتریم ندارد [۱۸]؛ بنابراین در مناطق تحقیق مختلف، مستلزم بررسی و مقایسه است. در این تحقیق، تأثیر داده‌های بازتحلیل ارا-۵ نسبت به ارا-اینتریم بر تغییرات دمای سطحی توده آب دریای خزر با استفاده از مدل‌سازی هیدرودینامیکی بررسی شده است. به‌طوری که ابتدا بردارهای میدان باد (در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا) در دو حالت داده‌های بازتحلیل مذکور در بازه زمانی ۲۰۱۸ با یکدیگر مقایسه شده، سپس با توجه به اعمال شرایط محیطی دریای خزر (داده‌های ورودی) در مدل اقیانوسی POM<sup>۱۲</sup> برای هر یک از دو حالت داده‌های بازتحلیل (به‌طور مجزا) پیاده‌سازی و مدل دو بار برای مدت ۱۰ سال (۲۰۰۹-۲۰۱۸) اجرا شد. در نهایت تغییرات دمای سطحی دریای خزر در دو حالت ارا-۵ و ارا-اینتریم با استفاده از خروجی‌های سال آخر مدل (۲۰۱۸) تجزیه و تحلیل شدند.

میانگین ماهانه مؤلفه‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریای خزر در دو حالت داده‌های بازتحلیل ارا-اینتریم و ارا-۵ از پایگاه داده‌های ECMWF برای سال ۲۰۱۸ در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

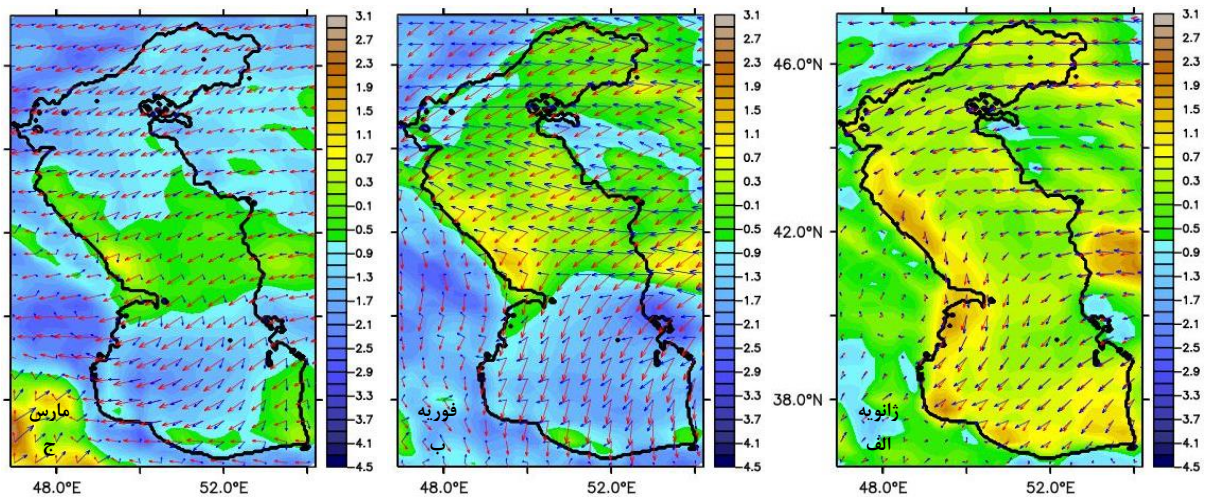
با توجه به شکل ۱، اختلاف اندازه سرعت و جهت باد در حالت‌های ارا-اینتریم و ارا-۵ در سه حوضه دریای خزر در طول سال متنوع و معنی‌دار است به‌ویژه این اختلاف‌ها اغلب در حوضه‌های شمالی و جنوبی دریای خزر مشهودتر است. در ماه ژانویه، در حوضه شمالی، تفاوت محسوسی در سرعت باد در دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵ مشاهده نمی‌شود. در حوضه میانی، به‌غیر از مرز غربی آن که سرعت باد در ارا-۵ نسبت به ارا-اینتریم بیشتر نشان داده شده است، در بقیه قسمت‌ها تقریباً سرعت باد در دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵ مشابه هم هستند. در حوضه جنوبی در مرزها (شرقی، جنوبی و غربی)، در مدل ارا-۵ سرعت باد، نسبت به ارا-اینتریم بزرگ‌تر است (شکل ۱-الف). در ماه فوریه، در حوضه شمالی، جهت باد، در ارا-اینتریم و ارا-۵ متفاوت، اما اندازه آن‌ها به‌جز قسمت کوچکی از مرز غربی که ارا-اینتریم نسبت به ارا-۵ مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد؛ بقیه قسمت‌ها تفاوت محسوسی بین دو نسخه مشاهده نمی‌شود. در حوضه میانی هم مانند حوضه شمالی تقریباً مشاهدات در هر دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵ یکسان است و در بخش کوچکی از مرز غربی برتری نسبی کمی، در اندازه سرعت در ارا-۵ دیده می‌شود. در حوضه جنوبی، در ارا-اینتریم اندازه سرعت باد بیشتر از ارا-۵ و جهت باد در ارا-اینتریم و ارا-۵ متفاوت نشان داده شد (شکل ۱-ب). در ماه مارس، در حوضه شمالی و جنوبی، سرعت باد ارائه‌شده با نسخه ارا-اینتریم نسبتاً و به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از ارا-۵ است، به‌استثنای بخش کوچکی در شرق و جنوب حوضه جنوبی که همانند حوضه میانی، سرعت باد در هر دو نسخه تفاوت زیادی ندارند (شکل ۱-ج).

[۲۴]، از گام زمانی مد خارجی ۲ s و گام زمانی مد داخلی ۹۰ و برای اعمال پردازش موازی، چهار هسته برای پردازشگر با شبکه محاسباتی  $135 \times 103$  یکپارچه‌سازی شد. داده‌های بردارهای سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و دیگر واداشت‌های جوی (بارش، تبخیر، شارش‌های تابشی و حرارتی) با گام زمانی ۶ ساعته به‌عنوان ورودی مدل، از پایگاه داده‌های ECMWF با وضوح افقی  $0.25^\circ$  و از نسخه‌های ارا-اینتریم و ارا-۵ استفاده شده است. داده‌های میدان دما و شوری و نیز ژرفاسنجی به‌ترتیب از پایگاه‌های داده‌ای WOA<sup>۲۲</sup> و <sup>۲۳</sup> GEBCO دریافت شد. بیشترین میزان ورودی آب رودخانه‌ها به دریای خزر از طریق رودخانه‌های ولگا (در این تحقیق: ۵ شاخه)، کورا و اورال انجام می‌گیرد. برای داده‌های این رودخانه‌ها از میانگین ماهیانه داده‌های NRL<sup>۲۴</sup> استفاده شد. پس از اجرای ۱۰ ساله مدل در دو حالت ارا-اینتریم و ارا-۵، خروجی‌های مدل به‌صورت روزانه (با حجم بیش از ۵۰۰GB) با فرمت Netcdf ذخیره شدند. برای صحت‌سنجی و مقایسه تغییرات میانگین سالانه دمای سطحی دریای خزر مستخرج از خروجی مدل در دو حالت ارا-۵ و ارا-اینتریم، از تصویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS استفاده شده است که داده‌ها از سایت <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> دانلود و پردازش شد.

### ۳. یافته‌ها و بحث

در این مطالعه، سال آخر خروجی‌های مدل (۲۰۱۸) تحلیل شد. پایداری و اعتبارسنجی این مدل قبلاً در مطالعه فراجوشی در دریای خزر بررسی شده است که جزئیات آن و پیکربندی مدل را می‌توان در تحقیق فلاح و منصور (۲۰۲۲) یافت [۲۶].

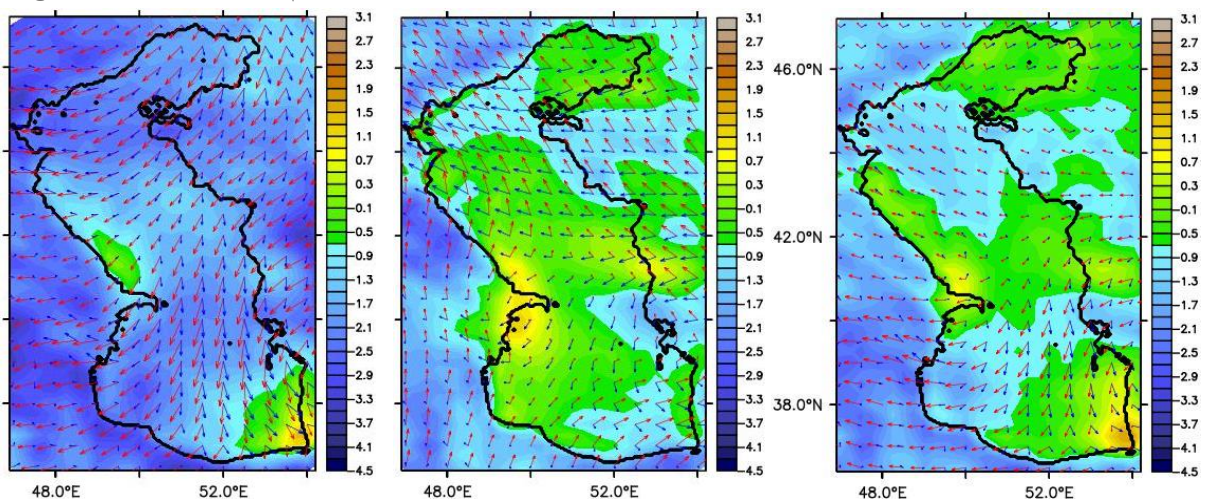
### ۳-۱. مقایسه میانگین ماهانه میدان باد در داده‌های بازتحلیل ارا-اینتریم و ارا-۵



شکل ۱. میدان سرعت باد در دو حالت ارا-اینتریم (رنگ قرمز) و ارا-۵ (رنگ آبی) در دریای خزر در ماه‌های فصل زمستان

در ماه آوریل، در بخش میانی متمایل به شرق و جنوب حوضه جنوبی، ارا-۵ سرعت باد را بیشتر و در بخش متمایل به غرب این حوضه، ارا-اینتریم مقادیر سرعت باد را بزرگ‌تر، نشان می‌دهد. در بخش میانی متمایل به شمال حوضه میانی، تفاوت محسوسی در سرعت باد در دو نسخه مشاهده نمی‌شود؛ همین‌طور در قسمت‌های دیگر این حوضه و حوضه شمالی، در هر دو نسخه تقریباً بزرگی سرعت باد، یکی است (شکل ۲-الف). در ماه می، جهت باد در تمام حوضه‌ها در دو نسخه، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم دارند. اما، اندازه سرعت باد ارائه‌شده توسط دو نسخه، در مناطق مختلف، متفاوت است.

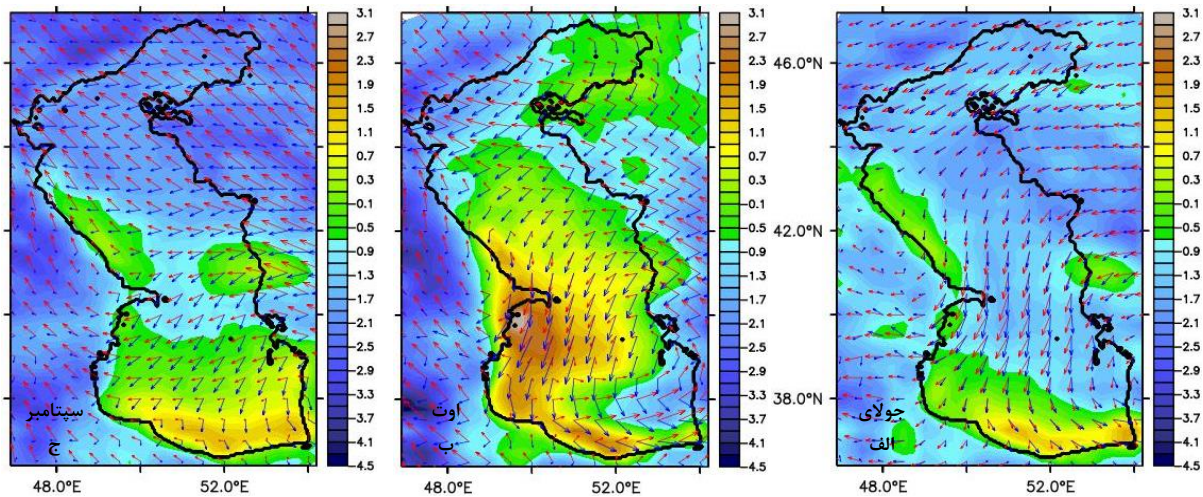
در شرق حوضه جنوبی و غرب حوضه شمالی، سرعت باد نسخه ارا-اینتریم، بزرگ‌تر و در بقیه مناطق این حوضه، سرعت باد نسخه ارا-۵ بزرگ‌تر است (شکل ۲-ب). در ماه جون، در تمام حوضه‌ها، سرعت باد نسخه ارا-اینتریم بزرگ‌تر از ارا-۵ است؛ در بعضی قسمت‌ها از جمله، در بخشی از شرق حوضه میانی و بخش میانی متمایل به غرب حوضه جنوبی، این تفاوت کمتر و در بقیه قسمت‌ها، تفاوت محسوس‌تر است. در بخش کوچکی از شرق حوضه جنوبی و قسمت جنوب غربی حوضه میانی، سرعت باد، در ارا-۵ کمی بزرگ‌تر از ارا-اینتریم ثبت شده است (شکل ۲-ج).



شکل ۲. میدان سرعت باد در دو حالت ارا-اینتریم (رنگ قرمز) و ارا-۵ (رنگ آبی) در دریای خزر در ماه‌های فصل بهار

اینتریم است؛ ولی در بقیه مناطق که شامل قسمتی از شمال حوضه جنوبی و حوضه‌های میانی و شمالی است، سرعت باد نسخه ارا-اینتریم نسبت به ارا-۵، بزرگ‌تر است (شکل ۳-ج).

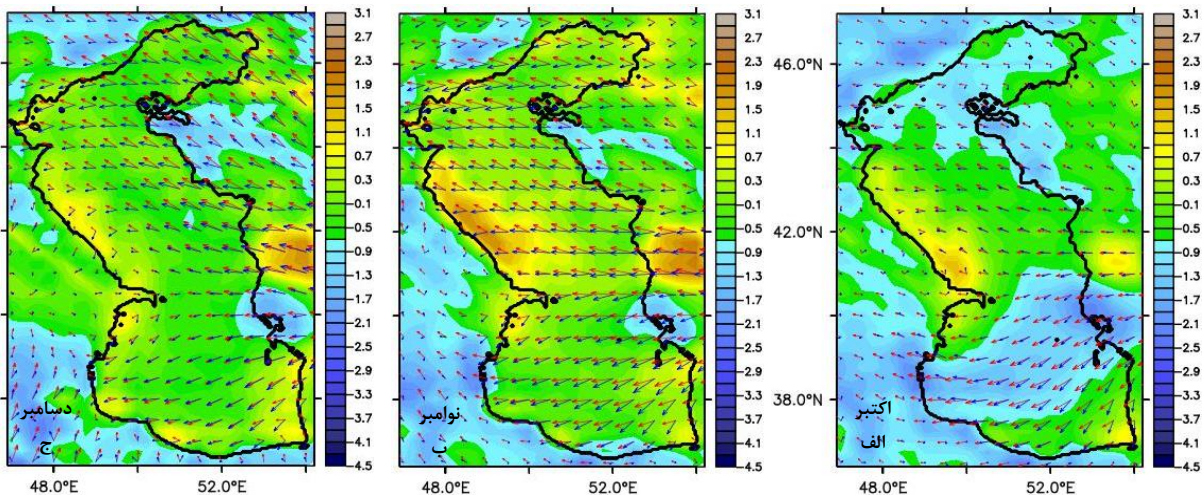
در ماه جولای، سرعت باد نسخه‌های ارا-اینتریم و ارا-۵ تقریباً مشابه و به‌طور دقیق‌تر، ارا-اینتریم به مقدار خیلی کم بیشتر از ارا-۵ هستند (شکل ۳-الف). در ماه آگوست، تقریباً در تمام حوضه‌ها، سرعت باد نسخه ارا-۵، مقادیر بیشتری نسبت به نسخه ارا-اینتریم را نشان می‌دهد (شکل ۳-ب). در ماه سپتامبر، در حوضه جنوبی، سرعت باد ارا-۵ بیشتر از ارا-



شکل ۳. میدان سرعت باد در دو حالت ارا-اینتریم (رنگ قرمز) و ارا-۵ (رنگ آبی - m/s) در دریای خزر در ماه‌های فصل تابستان

مشاهده می‌شود (شکل ۴-الف). در ماه نوامبر نیز، مقدار سرعت باد در هر دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵ تقریباً یکسان است و کمی تفاوت در جهت باد مشاهده می‌شود. در قسمت شرقی حوزه میانی، ارا-۵ برای سرعت باد، مقادیر نسبتاً بیشتری را نشان می‌دهد (شکل ۴-ب).

در ماه اکتبر، در بیشتر مناطق دریای خزر، اندازه سرعت باد دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵، تقریباً یکسان است. در بعضی نواحی همچون قسمت‌های میانی و جنوبی حوضه جنوبی، سرعت باد نسخه ارا-اینتریم نسبت به نسخه ارا-۵، مقادیر کمی بیشتری را نشان می‌دهد و اختلاف جزئی بین دو نسخه



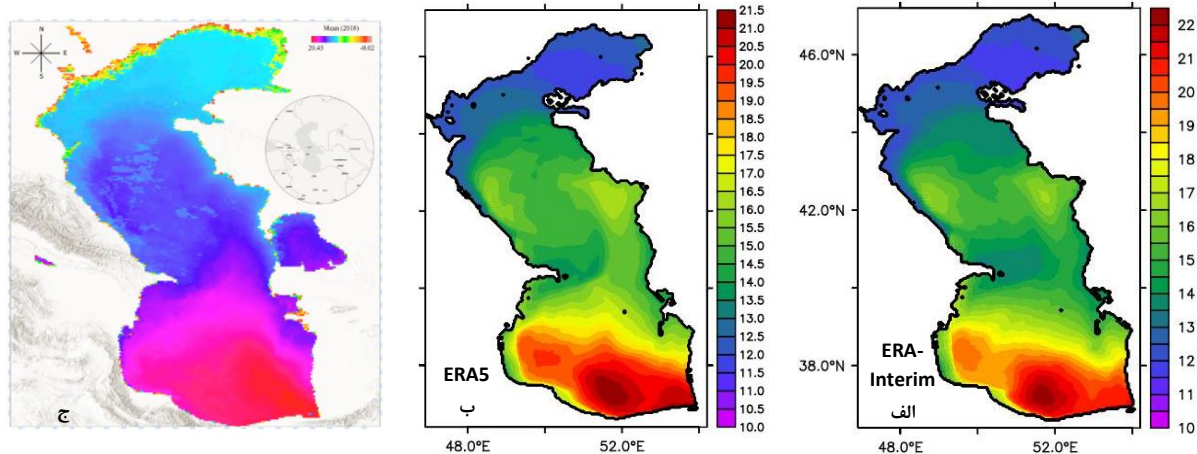
شکل ۴. میدان سرعت باد در دو حالت ارا-اینتریم (رنگ قرمز) و ارا-۵ (رنگ آبی - m/s) در دریای خزر در ماه‌های فصل پاییز

### ۲-۳. مقایسه میانگین سالانه تغییرات دمای سطحی

#### دریای خزر با تصویر ماهواره‌ای

میانگین تغییرات سالانه دمای سطحی دریا برای مقایسه خروجی‌های مدل (با استفاده از دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵) با تصویر ماهواره‌ای، نشان از تطابق نسبتاً خوب خروجی‌های مدل با تصویر ماهواره‌ای است (شکل ۵).

در ماه دسامبر، در حوضه جنوبی و بخش‌های مرزی حوضه میانی و جنوبی، بردارهای سرعت باد در دو نسخه، تقریباً بر هم منطبق هستند و تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود؛ اما در بخش‌های مرکزی و شمالی حوضه میانی و کل حوضه شمالی، جهت باد در دو نسخه کمی متفاوت است، درحالی‌که اندازه سرعت باد در دو نسخه تفاوت ناچیزی را نشان می‌دهند (شکل ۴-ج).



شکل ۵. میانگین تغییرات سالانه (۲۰۱۸) دمای سطحی (°C) دریای خزر: خروجی مدل (الف. ارا-اینتریم و ب. ارا-۵) و ج. تصویر ماهواره‌ای

(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)

است (شکل ۶). در فصل بهار، تغییرات دما در نیمه بالایی دریای خزر در این دو حالت ناچیز است؛ ولی در مرز دو حوضه جنوبی و میانی و نیز در مناطق عمیق حوضه جنوبی، اختلاف دمای محسوس مشاهده می‌شود (شکل ۷).

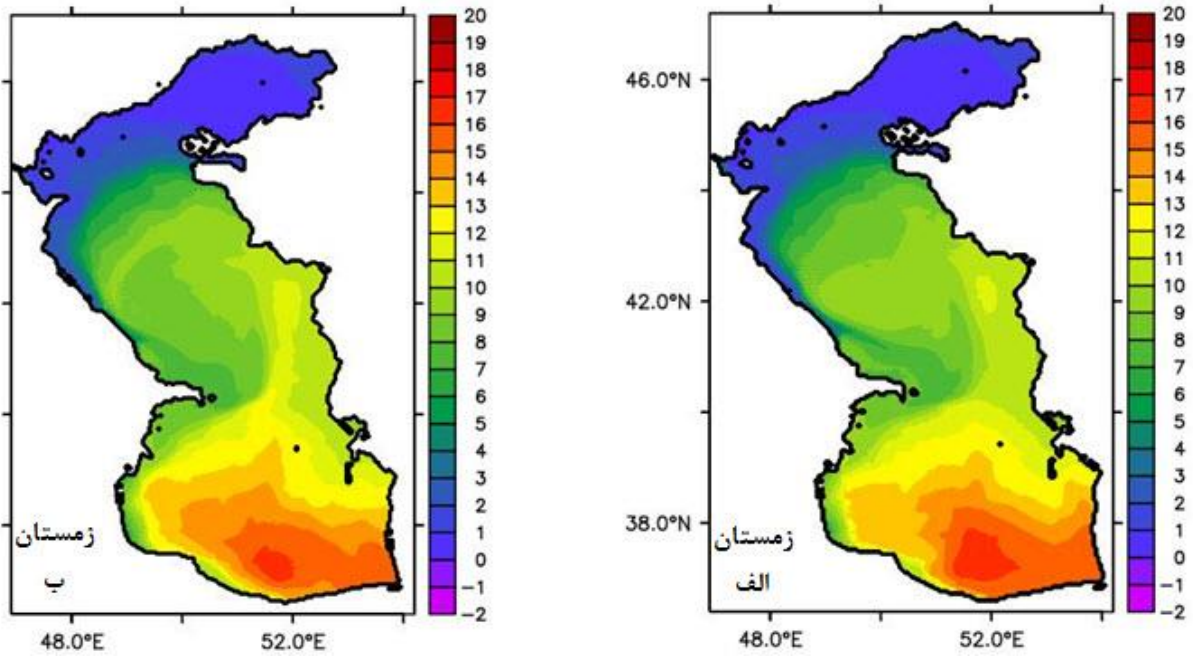
هرچند تفاوت نسبتاً محسوسی بین خروجی‌های مدل به‌ویژه در حوضه جنوبی مشاهده می‌شود به‌طوری‌که میزان بیشینه دمای سطحی دریا در حالت ارا-۵ (۲۱/۵ °C) نسبت به ارا-اینتریم (۲۲/۵ °C) تطابق بهتری با تصویر ماهواره‌ای دارد (۲۰/۵ °C).

در فصل تابستان، اختلاف دما (حالت ارا-۵ در مقایسه با ارا-اینتریم) در حوضه جنوبی، مناطق مرزی بین دو حوضه میانی و جنوبی و در مرز غربی حوضه میانی محسوس است. به‌طوری‌که در حالت ارا-۵ کاهش دما در حوضه جنوبی (مناطق عمیق) و افزایش دما در نواحی مرزی شرقی (مناطق کم‌عمق) بین دو حوضه میانی و جنوبی مشاهده می‌شود (شکل ۸). در فصل پاییز مانند فصل‌های گذشته اختلاف دما اغلب در نیمه جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود. به‌طوری‌که تغییرات دما (سردتر و گرم‌تر شدن مرزهای غربی و شرقی آپشرون) در حالت ارا-۵ می‌تواند ناشی از تغییرات شدیدتر جریان‌های دریایی باشد (شکل ۹).

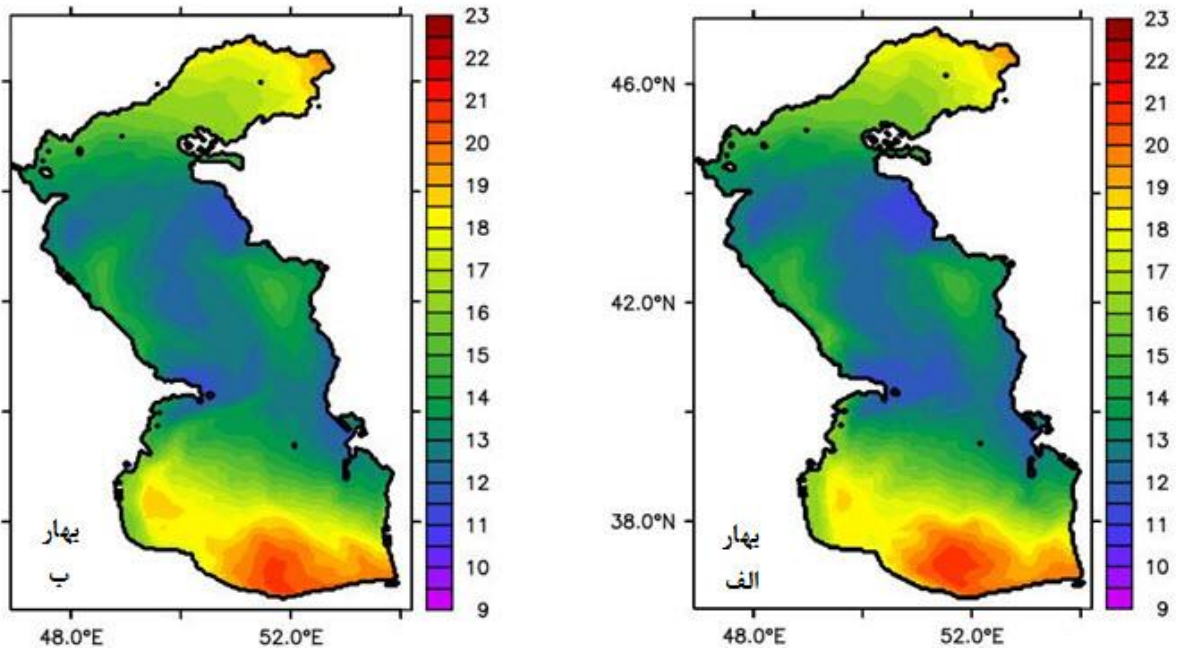
### ۳-۳. مقایسه میانگین فصلی دمای سطحی دریای خزر

#### در حالت‌های ارا-اینتریم و ارا-۵

همان‌طور که در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده‌اند، در فصل زمستان، در حوضه شمالی تغییرات دما در دو حال ارا-اینتریم و ارا-۵ مشاهده نمی‌شود؛ اما تغییرات دمای نسبتاً محسوسی در دو حوضه میانی و جنوبی دیده می‌شود به‌ویژه در نیمه پایینی حوضه میانی که در حالت ارا-۵ نشان از گردش پادساعتگرد قوی‌تری است به‌طوری‌که جریان غربی قوی‌تر حوضه میانی و جریان شرقی آن که موجب انتقال توده‌های آب از مرزهای حوضه جنوبی به بخش شرقی حوضه میانی

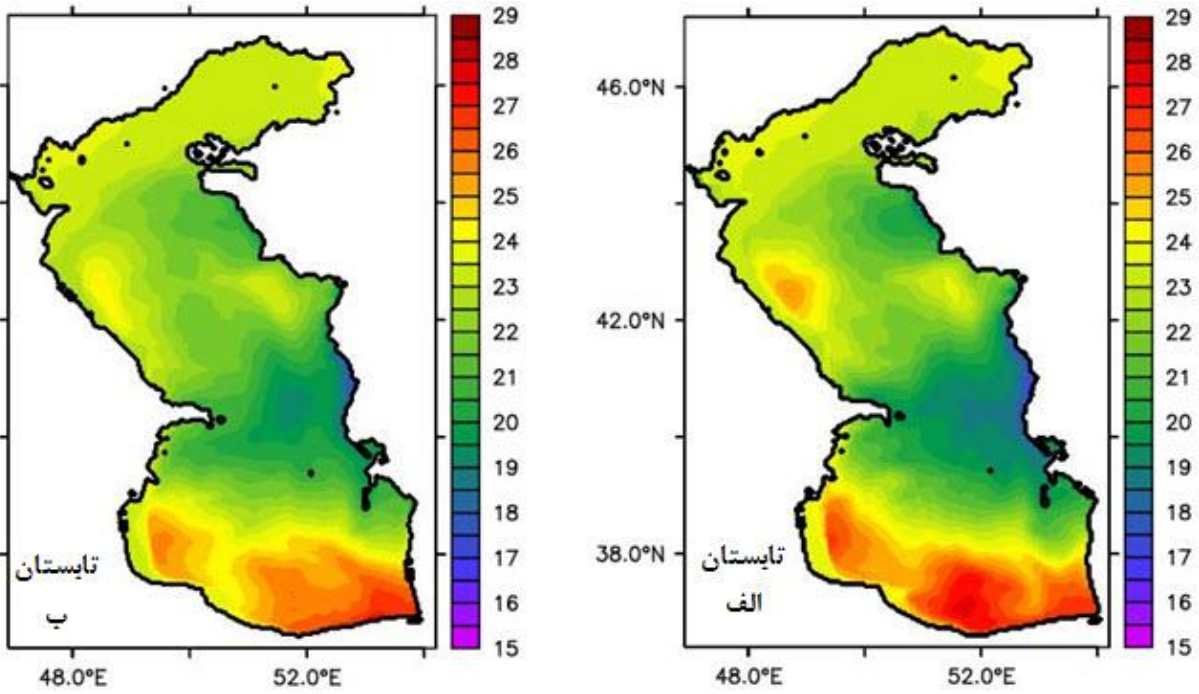


شکل ۶. تغییرات دمای سطحی (C°) دریای خزر در فصل زمستان در سال ۲۰۱۸، الف) ارا-اینتریم و ب) ارا-۵

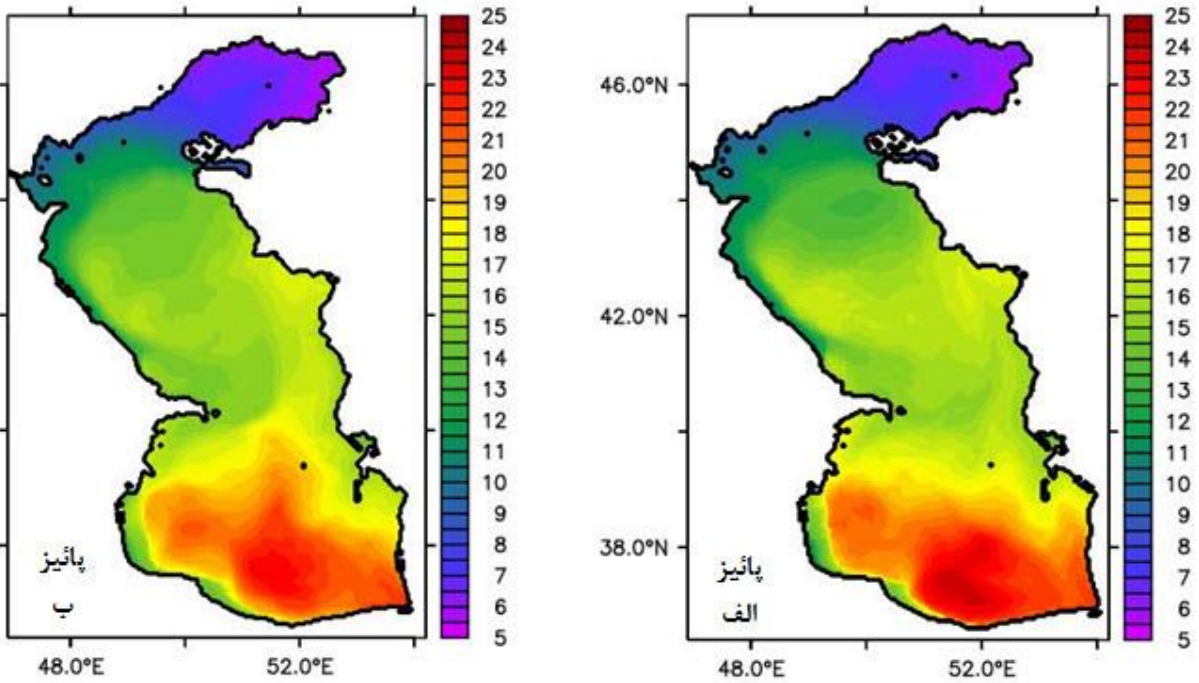


شکل ۷. تغییرات دمای سطحی (C°) دریای خزر در فصل بهار در سال ۲۰۱۸، الف) ارا-اینتریم و ب) ارا-۵





شکل ۸. تغییرات دمای سطحی (C°) دریای خزر در فصل تابستان در سال ۲۰۱۸، الف) ارا-اینتریم و ب) ارا-۵



شکل ۹. تغییرات دمای سطحی (C°) دریای خزر در فصل پاییز در سال ۲۰۱۸، الف) ارا-اینتریم و ب) ارا-۵

## ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، از مدل اقیانوسی POM و نسخه mpiPOM که برای دریای خزر پیکربندی شده [۲۴ و ۲۵]، استفاده شد. میانگین ماهانه مؤلفه‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریای خزر در دو حالت داده‌های بازتحلیل ارا-اینتریم و ارا-۵ از پایگاه داده‌های ECMWF برای سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهند که در فصل زمستان، اختلاف تغییرات زمانی و مکانی میدان باد (اندازه سرعت و جهت) در ماه فوریه در دریای خزر کاملاً مشهود است به طوری که اندازه سرعت داده‌های ارا-اینتریم نسبت به ارا-۵ در حوضه‌های جنوبی بیشتر است. در فصل بهار، تغییرات جهت باد داده‌های ارا-اینتریم و ارا-۵ در ماه می در کل سه حوضه و نیز در دو ماه دیگر در حوضه جنوبی دریای خزر قابل توجه است. اندازه سرعت باد داده‌های ارا-اینتریم نسبت به ارا-۵ در ماه ژوئن در کل دریای خزر بیشتر است. در فصل تابستان، کمترین اختلاف تغییرات میدان باد در دو نسخه ارا-اینتریم و ارا-۵ در ماه جولای و بیشترین اختلاف میدان باد در ماه سپتامبر است. هرچند بیشترین اختلاف اندازه سرعت باد این دو نسخه در ماه اگوست و در نیمه شرقی حوضه جنوبی مشاهده می‌شود که اندازه سرعت باد داده‌های ارا-۵ نسبت به ارا-اینتریم به مراتب بیشتر است. در فصل پاییز، کمترین اختلاف جهت باد در این دو نسخه در حوضه جنوبی است و بیشترین اختلاف اندازه سرعت باد در ماه نوامبر در حوضه میانی مشاهده می‌شود. با مقایسه دماهای سطحی دریای خزر، با توجه به خروجی‌های مدل (با استفاده از داده‌های ارا-اینتریم و ارا-۵) و تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های بازتحلیل ارا-۵ تطابق بیشتری نسبت به ارا-اینتریم دارند و استفاده از داده‌های ارا-۵، از نظر کمی، باعث بهبود نتایج میانگین دمای سالانه خروجی مدل به میزان حدود ۷٪ در حوضه جنوبی دریای خزر شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند علی‌رغم وضوح مکانی و زمانی بهتر داده‌های بازتحلیل ارا-۵ نسبت به ارا-اینتریم، استفاده از مجموعه داده ارا-۵، در حوضه شمالی، بهبود چندانی نسبت به ارا-اینتریم نشان نمی‌دهد. اختلاف تغییرات ماهانه دمای سطحی دریا در حوضه میانی نسبتاً محسوس اما در حوضه جنوبی نسبت به دو

حوضه دیگر بیشتر است. به‌عنوان نتیجه کلی این تحقیق، در فصل‌های مختلف، اختلاف دمای سطح دریا ناشی از داده‌های بازتحلیل ارا-۵ و ارا-اینتریم، اغلب در نیمه جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود. به طوری که تغییرات دمای سطحی دریا در مرز بین دو حوضه میانی و جنوبی (سردتر و گرم‌تر شدن مرزهای غربی و شرقی آپشرون) با توجه به گردش عمومی پادساعتگرد جریان دریای خزر [۲۷] می‌تواند ناشی از تغییرات شدیدتر جریان‌های دریایی از جمله گردش پادساعتگرد حوضه میانی [۱۷ و ۲۸] در حالت ارا-۵ باشد.

## سپاسگزاری

این تحقیق در آزمایشگاه دینامیک شارهای ژئوفیزیکی دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است؛ بدین وسیله نویسندگان از مسئولان محترم کمال قدردانی و تشکر را دارند.

## مراجع

- [1] Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer DP, Bechtold P. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. 2011 Apr;137(656):553-97. <https://doi.org/10.1002/qj.828>, 2011
- [2] Poli P, Healy SB, Dee DP. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2010 Oct;136(653):1972-90.
- [3] Szczypta C, Calvet JC, Albergel C, Balsamo G, Boussetta S, Carrer D, Lafont S, Meurey C. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011 Feb 25;15(2):647-66.
- [4] Decker M, Brunke MA, Wang Z, Sakaguchi K, Zeng X, Bosilovich MG. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations. *Journal of Climate*. 2012 Mar 15;25(6):1916-44.
- [5] 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.

- [۱۷] منصوری داریوش، صدری نسب مسعود، اکبری نسب محمد. تغییرات فصلی و سالانه میدان باد و گردش آب سطحی دریای خزر. مجله علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۷؛ ۸۲-۶۸:(۱)۱۷
- [۱۸] فرزانه سعید، شریفی محمدعلی، اکبرزاده عاطفه. مقایسه مجموعه داده‌های ERA-Interim و ERA5 در محاسبه تغییرات جرم کوتاه‌مدت جوی و اثرات آن بر ارتفاع ژئوئید. فیزیک زمین و فضا. ۱۳۹۹؛ ۴۶(۳): ۴۹۷-۵۱۵.
- [19] Kowalewski M. A three-dimensional hydrodynamic model of the Gulf of Gdansk. *Oceanological Studies*. 1997;4(26):77-98.
- [20] 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).
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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>
- [24] 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.
- [۲۵] منصوری داریوش، صدری نسب مسعود، اکبری نسب محمد. مدل‌سازی ساختار میدان‌های دما و شوری آب دریای خزر با استفاده از مدل POM. نشریه هیدرو فیزیک. ۱۳۹۴؛ ۱(۱): ۱-۱۳.
- [26] Fallah F, Mansoury D. Coastal upwelling by wind-driven forcing in the Caspian Sea: A numerical analysis. *Oceanologia*. 2022 Apr 1;64(2):363-75. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.003>
- [27] Tuzhilkin VS, Kosarev AN. Thermohaline structure and general circulation of the Caspian Sea waters. *The Caspian Sea Environment*. 2005:33-57.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [۸] زرشکیان سجاد، منصوری داریوش. ارزیابی انرژی گرمایی اقیانوسی جهت تأمین انرژی الکتریکی سکوهای نفت و گاز فراساحلی دریای خزر. فیزیک زمین و فضا. ۱۳۹۹؛ ۴۶(۲): ۳۳۱-۴۵. 10.22059/JESPHYS.2020.289441.1007161
- [9] Hersbach H, Dee D. ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter 147. Reading, UK: ECMWF. 2016, available at: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>
- [10] 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>
- [11] Hennermann K, Berrisford P. What are the changes from ERA-Interim to ERA5. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. 2018 Jan 31. <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=74764925>.
- [12] Hoffmann L, Günther G, Li D, Stein O, Wu X, Griessbach S, Heng Y, Konopka P, Müller R, Vogel B, Wright JS. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019 Mar 11;19(5):3097-124.
- [13] Gunduz M, Özsoy E. Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea. *Ocean Science*. 2014 Jun 10;10(3):459-71. <https://doi.org/10.5194/osd-11-259-2014>.
- [14] Kostianoy AG, Kosarev AN, editors. *The Caspian sea environment*. Springer Science & Business Media; 2005.
- [15] Baidin SS, Kosarev AN. *The Caspian Sea. Hydrology and hydrochemistry*. Nauka. Moscow. 1986;261(272):25.
- [16] Lavrova OY, Mityagina MI, Sabinin KD, Serebryany AN. Satellite observations of surface manifestations of internal waves in the Caspian Sea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011 Dec;47(9):1119-26.

- 9- Northern Caspian Basin
- 10- Middle Caspian Basin
- 11- Southern Caspian Basin
- 12- Princeton Ocean Model
- 13- Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
- 14- National Oceanic and Atmospheric Administration
- 15- Princeton Dynamic Analysis Institute
- 16- Blumberg
- 17- Mellor
- 18- Arakawa C
- 19- Mellor-Yamada
- 20- message passing interface Princeton Ocean Model
- 21- Advance Taiwan Ocean Prediction
- 22- World Ocean Atlas
- 23- General Bathymetric Chart of the Oceans
- 24- Naval Research Laboratory

[28] Knysh VV, Ibrayev RA, Korotaev GK, Inyushina NV. Seasonal variability of climatic currents in the Caspian Sea reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity into the model of water circulation. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2008 Apr;44(2):236-49.

## پی نوشت

- 1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- 2- ERA (ECMWF Reanalysis)
- 3- ERA-40
- 4- ERA-20CM
- 5- ERA-20C
- 6- ERA-Intrim
- 7- ERA5
- 8- Caspian Sea