

## الگوی امواج ناشی از باد در دریای خزر

حسین فرجامی<sup>۱\*</sup>، اکبر رشیدی ابراهیم حصار<sup>۲</sup>

h.farjami@inio.ac.ir

akbar.rashidi@modares.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

### چکیده

شناخت مشخصه های امواج منطقه از نیازمندی های اولیه در هر فعالیت دریایی و مطالعات زیست محیطی است. در این تحقیق با استفاده از مدل سازی عددی با شبکه محاسباتی نامنظم مثلی به شبیه سازی امواج ناشی از باد در حوزه دریای خزر پرداخته شده است. سپس میدان موج دریای خزر در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از مدل عددی SWAN با شبکه محاسباتی نامنظم و میدان باد مجموعه داده های بازتحلیل Era-Interim با دقت شبکه ۰/۱۲۵ درجه استفاده شده است. نتایج مدل با داده های اندازه گیری بویه های موج نگار بندر نوشهر، امیرآباد و انزلی صحت سنجی شد. برای بالا بردن دقت پیش بینی، مدل با ضرایب مختلف رشد موج و ضریب استهلاك انرژی با سفیدک موج مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین ضریب آن ها برای امواج ناشی از باد در دریای خزر انتخاب شد. سپس برای یک دوره ۲۰ ساله علاوه بر استخراج میانگین ماهیانه میدان باد و موج شاخص، میدان امواج ناشی از باد با استفاده از روش تحلیل مؤلفه های اصلی در حوزه مطالعاتی استخراج شد. نتایج تحقیق نشان می دهد مؤلفه اول تحلیل حدود ۷۰٪، مؤلفه دوم حدود ۲۰٪ و مؤلفه سوم حدود ۵٪ از الگوی کلی آنومالی امواج ناشی از باد را در دریای خزر می تواند تفسیر نماید و می توان تأثیر امواج محلی را در الگوی کلی امواج ناشی از باد منطقه به شکل جداگانه بررسی کرد.

**واژه های کلیدی:** امواج ناشی از باد، دریای خزر، مدل سازی عددی، تحلیل مؤلفه های اصلی

### ۱. مقدمه

مطالعات اولیه هر فعالیت ساحلی و دریایی، کسب اطلاعات درست و کامل از مشخصه های امواج غالب منطقه مورد نظر از نیازهای اساسی هر پروژه ای در منطقه است. به عنوان

امواج یکی از عوامل مهم و پیچیده در حوزه های دریایی و اقیانوسی است که ماهیت کاملاً تصادفی دارد [۱]. در

دارند [۶-۹]. شناخت پدیده‌های فیزیکی حاکم بر جو و اقیانوس دریای خزر به دلیل شرایط خاص این حوزه اهمیت زیادی دارد. از مهم‌ترین این پدیده‌های فیزیکی می‌توان به باد سطحی و امواج ناشی از آن در دریای خزر اشاره کرد. شناخت این چنین پدیده‌هایی از نیازهای اولیه و ضروری برای مدیریت و برنامه‌ریزی در پروژه‌های ملی و منطقه‌ای در بزرگ‌ترین دریاچه جهان است [۱۰-۱۲]. اطلاعات میدانی محدودی در مورد باد سطحی و امواج ناشی از آن با دقت مکانی و زمانی مناسب روی دریای خزر وجود دارد. اطلاعات مکانی در دسترس، اغلب در مناطق محدود کم عمق ساحلی است. بنابراین بهترین راهکار برای پیش‌بینی شرایط جوی کل و محلی حاکم بر منطقه، استفاده از داده‌های بازتحلیل و داده‌های ماهواره‌ای در مدل‌های عددی است [۱۳-۱۵]. اما به دلیل این که داده‌های بازتحلیل و داده‌های ماهواره‌ای برای مناطق خاص و دریاها آزاد با مقیاس‌های متفاوت اعتبارسنجی شده‌اند، بنابراین، این مجموعه داده‌ها باید از لحاظ دقت و درستی برای منطقه مورد نظر ارزیابی شوند [۱۶].

به دلیل اهمیت دریای خزر، مطالعات مختلفی بر میدان باد و امواج آن انجام شده است. کمیجانی و همکاران در سال ۱۳۹۴ با استفاده از مدل عددی SWAN مشخصات امواج در خزر جنوبی را شبیه‌سازی کرده و با استفاده از اندازه‌گیری میدانی صحت‌سنجی کردند. آن‌ها خروجی مدل را با استفاده از داده‌های مختلف میدان باد مورد ارزیابی قرار دادند [۱۷]. در تحقیقی دردی‌زاده و همکاران در سال ۱۳۹۳ در بندر امیرآباد پس از مدل‌سازی امواج به واسنجی نتایج آن پرداختند. سپس با به دست آوردن ارتفاع موج شاخص، انرژی امواج را در منطقه مورد مطالعه محاسبه نمودند [۱۸]. رجبی و همکاران در سال ۱۳۹۲ امواج ناشی از باد را در منطقه بندر انرژی مدل‌سازی کردند و مشخصه امواج را به دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که مدل استفاده شده برای قله‌های موج مقدار دست‌پایینی برآورد می‌نماید [۱۹].

میسلسونوف و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پروژه اطلس انرژی امواج و باد در سواحل روسیه به مدل‌سازی امواج ناشی از باد

نمونه، برای بررسی پایداری هر سازه دریایی و سکوه‌های نفتی نیازمند دانستن مقدار نیروی دینامیکی ناشی از برخورد امواج منطقه است. همچنین بیشتر مسائل زیستی ساحلی و دریایی تحت تأثیر امواج آن حوزه است. بنابراین برای مدیریت بهینه و پایداری در صنعت شیلات، بنادر و دریانوردی، مدیریت بنادر، حمل و نقل دریایی، فعالیت‌های نفتی و آلودگی‌های دریایی، تبادل جو-اقیانوس و سایر پدیده‌های مرتبط نیازمند دانستن مشخصه امواج منطقه مورد نظر است [۲، ۳]. نبود آگاهی از مشخصه امواج غالب در زمان و مکان معین، می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر انسانی و مالی مختلفی را ایجاد نماید. امواج غالب در دریاها به ویژه دریای خزر امواج ناشی از باد سطحی است. طبیعت تصادفی این امواج باعث پیچیدگی پیش‌بینی این پدیده می‌شود. به شکل کلی مشخصه‌های تصادفی امواج با استفاده از اندازه‌گیری میدانی، شبیه‌سازی عددی، مدل‌های فیزیکی، حل تحلیلی و پایش ماهواره‌ای قابل تعیین است. امروزه مدل‌های عددی مختلفی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی امواج مورد استفاده قرار می‌گیرد، به عنوان نمونه می‌توان از CCHE2D-COAST، WAM، WAVEWATCH، NSSM، MIKE، SWAN<sup>۱</sup> به منظور مدل‌سازی امواج در مناطق عمیق و آب کم عمق نزدیک ساحل نام برد [۴، ۵].

دریای خزر از جنبه‌های مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی مورد توجه کشورهای حاشیه این دریاست. بنابراین شناخت پدیده‌های فیزیکی مختلف حاکم بر این حوزه از نیازهای اساسی در مدیریت و استفاده بهینه محسوب می‌شود. دریای خزر بزرگ‌ترین حوزه آبی بسته جهان است که بسته بودن آن از مشخصه‌های اصلی عدم تشابه آن با آب‌های آزاد است. اما دیگر مشخصه‌های دریای خزر مانند اندازه، عمق، مشخصه‌های شیمیایی، ویژگی ساختار دما-شوری و چرخش آب در این حوزه باعث می‌شود، این دریا را بتوان در دسته‌بندی دریاها در نظر گرفت. با توجه به وجود منابع زیستی و طبیعی خاص دریای خزر همچنین منابع فسیلی مانند نفت و گاز همواره کشورهای هم‌جوار رقابت گسترده‌ای بر سر مالکیت و استفاده از منابع موجود در این حوزه دریایی

(MSE) و شاخص پراکندگی<sup>۹</sup> (SI) مطابق روابط ۱ تا ۴ استفاده شده است.

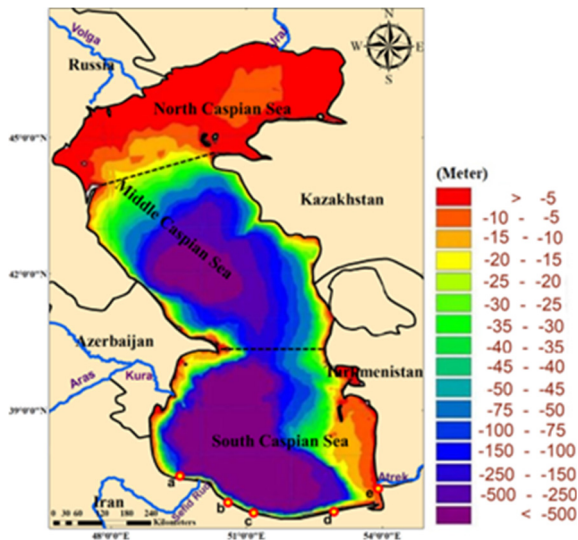
$$\text{Bias} = \bar{y} - \bar{x} \quad (۱)$$

$$R = \frac{\sum_i [(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (۲)$$

$$MSE = \frac{\sum_i (x_i - y_i)^2}{n} \quad (۳)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}} \times 100 \quad (۴)$$

که  $n$  تعداد داده‌ها،  $x$  و  $y$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  به ترتیب میانگین آن‌هاست.



شکل ۱. حوزه دریای خزر همراه با رودخانه‌های اصلی در حوزه آبریز آن

یکی از ابزارهای کاربردی در اقیانوس‌شناسی، هواشناسی و تحقیقات اقلیمی برای استخراج الگوهای مکانی یک پارامتر و تغییرات آن با زمان استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی یا توابع متعامد تجربی است [۲۰]. این روش کارساز برای مقایسه متغیرها در سری زمانی تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک پارامتر است. یکی از قابلیت‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی این است که توصیف زمانی و فضایی از سری داده‌ها را به شکل توابع متعامد تجربی یا به اصطلاح آماری، به شکل مدهای اصلی ارائه می‌دهد [۲۱]. در این روش اغلب توزیع فضایی واریانس در چند تابع عمودی اولیه است، این الگوها ارتباط تنگاتنگی با مکانیسم دینامیکی ممکن را ارائه می‌دهند. بنابراین روش توابع متعامد ابزاری است که با آن مدهای

در دریای خزر با استفاده مدل WWIII در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با احتمال ۳٪ امکان ایجاد بیشینه ارتفاع موج ۱۱/۷ متر وجود دارد. روسو و اونیا در سال ۲۰۱۳ انرژی امواج و باد را در دریای خزر مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتایج خود را با داده‌های ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که قسمت شمالی خزر پتانسیل زیادی برای استخراج انرژی تجدیدپذیر دارد.

در این مطالعه نیز با کمک مدل عددی SWAN با شبکه نامنظم مثلثی با تمرکز بر سواحل امواج ناشی از باد در دریای خزر شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۲</sup> الگوهای مختلف میدان امواج ناشی از باد در حوزه دریای خزر برآورد شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در دریای خزر از مدل عددی نسل سوم SWAN با شبکه محاسباتی نامنظم و باد متغیر استفاده شده است. برای این منظور از مجموعه داده‌های بازتحلیل Era-Interim با دقت شبکه ۰/۱۲۵ درجه از مرکز داده‌های سرویس تغییرات آب‌وهوایی کپرنیک<sup>۳</sup> بر حوزه دریای خزر استفاده شد. این داده‌ها که دارای مؤلفه شمال‌سوی و شرق‌سوی هستند به فرمت شبکه ماتریسی قابل خواندن برای مدل SWAN در آمدند. در این مطالعه یک شبکه نامنظم درشت در قسمت‌های مرکزی حوزه و شبکه ریزشده در نزدیک سواحل منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی امواج ناشی از باد علاوه بر اطلاعات باد با دقت مناسب، نیازمند اطلاعات پستی و بلندی بستر است. بنابراین از اطلاعات سایت GEBCO<sup>۴</sup> (مورد حمایت سازمان بین‌المللی هیدروگرافی) (IHO<sup>۵</sup>) و کمیته بین‌الدول اقیانوس‌شناسی (IOC) یونسکو با دقت ۱۵ ثانیه استفاده شد (شکل ۱).

برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در منطقه مورد نظر از شاخص‌های خطا شامل اریبی<sup>۶</sup>، ضریب همبستگی<sup>۷</sup> (R) پیرسون، خطای مربع میانگین<sup>۸</sup>

توصیف امواج اقیانوسی در یک زمان معین استفاده از امواج غالب است، بیشتر توصیف‌های عملیاتی از امواج استفاده از مفهوم طیف موج است. طیف موج تابعی از نوسانات سطح آزاد آب است که با استفاده از تابع فوریه توصیف می‌شود [۲۳].

مدل SWAN نسل سوم مدل عددی است که به حل معادله تعادل طیف انرژی موج می‌پردازد. این معادله طیف موج را بر اساس زمان، جغرافیای منطقه و طیف فضایی توصیف می‌کند. این مدل قابلیت اجرا در وضعیت‌های نسل اول و دوم را نیز دارد. این مدل بیشتر برای مناطق ساحلی، دریاچه‌ها، مصب‌ها و دریاها بسته توسعه داده شده است. مدل یادشده می‌تواند مشخصه‌های امواج را به شکل دلخواه در دو حالت ایستا و غیرایستا در دستگاه مختصات دکارتی، منحنی‌الخط یا کروی با در نظر گرفتن پستی و بلندی بستری، ضریب اصطکاک بستر، جریان و میدان باد بر اساس معادله حرکت با در نظر گرفتن منابع تولید و استهلاك انرژی تخمین بزند. در این تحقیق، از نسخه 41.31 مدل SWAN سال ۲۰۱۹ دانشگاه تکنولوژی دلفت که به شکل رایگان در اختیار کاربران گذاشته شده است، استفاده شد.

این مدل تولید و انتشار امواج ناشی از باد را بدون هیچ قید و شرط از پیش تعیین شده‌ای برای توسعه رشد امواج حل می‌کند و شامل فرایند انکسار، پراش، استهلاك ناشی از کم عمق شدن، برهم کنش‌های سه گانه و چهارگانه موج-موج، استهلاك در اثر ایجاد سفیدک قله موج، استهلاك ناشی از شکست موج و استهلاك ناشی از اصطکاک بستر است.

مبنای مدل SWAN، حل معادله انرژی یا طیف انرژی موج در فرکانس‌های مختلف با ترم‌های چشمه‌ها و چاه‌ها است. بنابراین مدل موج SWAN معادله تعادل حرکت یا کنش را به صورت رابطه ۹ حل می‌کند.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{s_{tot}}{\sigma} \quad (9)$$

در این رابطه،  $N(\sigma, \theta, x, y, t)$  طیف کنش چگالی است و جمله اول نرخ تغییر چگالی کنش را نشان می‌دهد؛ جمله دوم بیانگر انتشار انرژی موج در فضای دوبعدی است. در این

فضایی و زمانی مختلف از یک مجموعه داده ماتریسی را می‌توان استخراج کرد [۲۲]. در این روش، برای آنالیز توابع متعامد تجربی ابتدا یک ماتریسی مانند  $F$  با ابعاد  $M \times N$  ایجاد می‌شود که  $M$  سطر (معرف مکانی) و  $N$  ستون (معرف زمانی) داده‌های استاندارد یا نرمال شده است (رابطه ۵).

$$F = \begin{matrix} \text{Time} \rightarrow \\ \left[ \begin{array}{cccc} F_1(1) & F_1(2) & \dots & F_1(N) \\ F_2(1) & F_2(2) & \dots & F_2(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_M(1) & F_M(2) & \dots & F_M(N) \end{array} \right] \\ \text{Location} \downarrow \end{matrix} \quad (5)$$

سپس داده‌های ماتریس  $F$  برای استخراج ماتریس کواریانس فضایی  $R_{FF}$  از میدان  $F_m(t)$  با ضرب-کردن ماتریس  $F$  در ترانپوز آن یعنی  $F^\dagger$  به دست می‌آید (رابطه ۶).

$$R_{FF} = F \times F^\dagger \quad (6)$$

در حالی که ماتریس کواریانس داده‌ها محاسبه می‌شود؛ محاسبه مقدار ویژه  $\Lambda$  از طریق بردار ویژه  $E$  با رابطه ۷ صورت می‌گیرد:

$$R_{FF} \times E = E \times \Lambda \quad (7)$$

در نهایت الگوی کل با جمع مؤلفه‌های عمود و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود. (رابطه ۸)

$$\text{Total Pattern} = \text{mean pattern} + \sum_{i=1}^n PC_i \times EOF_i \quad (8)$$

در رابطه ۸، EOF نشان‌دهنده الگوی فضایی و PC دامنه نوسانی هر EOF در بازه زمانی است. بنابراین این امکان فراهم می‌شود که هر یک از مدها را با استفاده از داده‌های بازتحلیل بازسازی کرد. با این روش به راحتی می‌توان مدهای دوم، سوم و دیگر مدها را برای الگوهای محلی استخراج نمود [۲۱].

### ۳. تئوری و محاسبات

طبیعت نامنظم باد، باعث ایجاد امواجی با ارتفاع و دوره زمانی نامنظم در محیط‌های آبی می‌شود. سطح دریا پیوسته در حال تغییر است؛ بدین معنی که با یک رویکرد نزدیک به واقعیت می‌توان حرکت کلی را توصیف کرد [۱]. در حالی که

۱۰۰ و ضریب استهلاک انرژی با سفیدک موج ( $C_{ds}$ ) برابر با ۰/۰۰۰۰۱۳۶ می‌تواند ارتفاع موج شاخص را با حداقل خطا یعنی با ضریب همبستگی ۸۵ درصد و بایاس ۰/۰۲ نسبت به اندازه‌گیری میدانی برآورد نماید. مدل در موقعیت بویه بندر امیرآباد، نوشهر و انزلی واسنجی شد. در شکل ۲ نمودار سری زمانی ارتفاع موج شاخص اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده را در موقعیت بویه بندر امیرآباد نشان می‌دهد. بنابراین ارزیابی آماری مدل مطابق جدول ۱ و مقایسه سری زمانی آن در شکل ۲ نشان می‌دهند نتایج مدل‌سازی دقت قابل‌قبولی دارد.

جدول ۱. شاخص‌های خطا برای ارتفاع موج شاخص به ضرایب مختلف ضریب رشد موج و ضریب استهلاک انرژی با سفیدک

$C_{ds}$	AGROW[a]	Biass	R (%)	MSE
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۰/۰۰۱۵	۰/۸۵	۶۵	۰/۸۹
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۰/۰۱	۰/۸۴	۶۲	۰/۸۷
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۰/۱	۰/۸۰	۶۰	۰/۸۱
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۱	۰/۶۹	۵۵	۰/۶۳
۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۱۵	۰/۱	۸۰	۰/۲۱
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۰/۰۰۰۱	-۰/۸۶	۶۲	۰/۹۰
۰/۰۰۰۰۱۳۶	۰/۰۰۰۰۱	-۰/۳۱	۸۰	۰/۲۸
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۰/۰۰۰۰۰۲	-۰/۵	۷۴	۰/۴
پیش‌فرض مدل		-۰/۸۵	۶۳	۰/۳۹
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۱۰۰	-۰/۲	۵۱	۰/۲۲
۰/۰۰۰۰۲۳۶	۵۰	-۰/۲۸	۵۰	۰/۲۴
۰/۰۰۰۰۱۳۶	۱۰۰	-۰/۲۰	۸۵	۰/۱۵

پس از این مرحله مدل برای کل دریای خزر اجرا شد و الگوی ارتفاع موج شاخص مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه بخش شمالی خزر در برخی ماه‌ها یخ می‌زند؛ بنابراین بخش مورد اشاره در مدل‌سازی امواج در نظر گرفته نشده است. میانگین سرعت باد و میانگین امواج ناشی از باد در سال ۲۰۰۰ تا اوایل ۲۰۲۰ برای ژانویه، فوریه، مارس و آوریل در شکل ۳؛ می، جون، جولای و آگوست در شکل ۴ و سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر در شکل ۵ آمده است. مطابق شکل ۳، بر اساس آمار ۲۰ ساله باد سطحی روی دریای خزر بیشترین سرعت باد میانگین در ماه مارس در

رابطه  $\vec{C}_g$  سرعت گروه موج و  $\vec{U}$  جریان محیط است.  $\sigma$  فرکانس نسبی برحسب رادیان است؛  $\theta$  جهت عمود بر قله موج یا جهت انتشار است. جمله  $S(\sigma, \theta)$  معادله منبع چگالی انرژی است. رابطه ۱۰ تمام فرایندهای فیزیکی که موجب تولید، استهلاک یا بازپخش انرژی موج می‌شوند را نشان می‌دهد که در پارامتر  $S_{tot}$  خلاصه می‌شود.

$$S_{tot} = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{wc} + S_{bot} + S_{db} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $S_{wind}$  ورودی انرژی به وسیله باد (رشد خطی یا نمایی به وسیله باد)  $S_{nl3}$ ،  $S_{nl4}$  و  $S_{nl3}$  به ترتیب، انتقال غیرخطی انرژی موج تحت برهمکنش سه گانه و چهارگانه،  $S_{wc}$  استهلاک موج در اثر سفیدک قله موج،  $S_{bot}$  اصطکاک بستر و  $S_{db}$  شکست موج ناشی از کاهش عمق را نشان می‌دهد [۲۴]. معادله یادشده پدیده‌های فیزیکی از قبیل انتشار موج، انکسار موج، خیز آب موج، ایجاد و رشد موج، افت موج و برهم‌کنش غیرخطی موج-موج را دربرمی‌گیرد.

با توجه به اینکه شبکه نامنظم خیلی بهتر می‌تواند مرزهای پیچیده از جمله؛ خط ساحلی و جزایر را به مدل معرفی نماید، بنابراین از این شبکه برای مدل‌سازی امواج در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. همچنین شبکه نامنظم این فرصت را فراهم می‌کند تا شبکه در منطقه مورد نظر تراکم‌تر باشد، به عبارتی مناطقی با پستی و بلندی متغیر شدید و متفاوت در سواحل و مصب‌ها را مدل نماید.

#### ۴. یافته‌ها

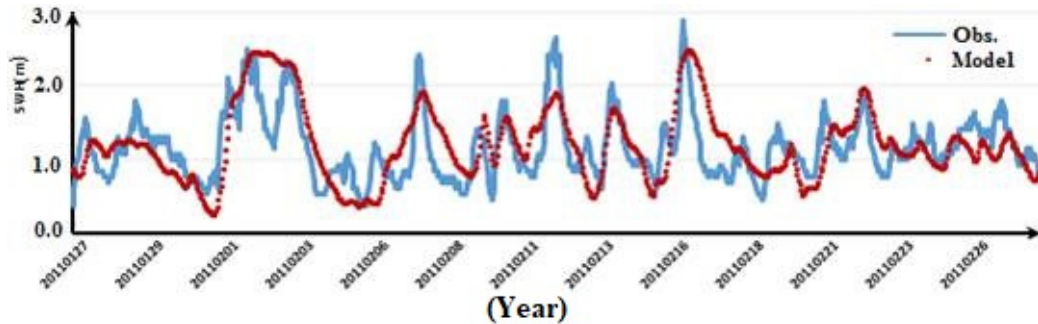
با توجه به اهمیت انتخاب طیف مناسب در مدل‌سازی امواج، در این مطالعه از طیف جان سوپ بر اساس مطالعه مظاهری و همکاران استفاده شد. برای حساسیت‌سنجی در مدل SWAN، ضریب رشد موج در نتیجه وزش باد محلی از تئوری رشد موج کاولری و مالانوته استفاده می‌کند [۲۵]. برای به دست آوردن این ضریب در دریای خزر مقادیر مختلفی بررسی شد که نتایج آن همراه با شاخص‌های خطا در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج بررسی نشان داد، مدل در ضریب رشد (AGROW)

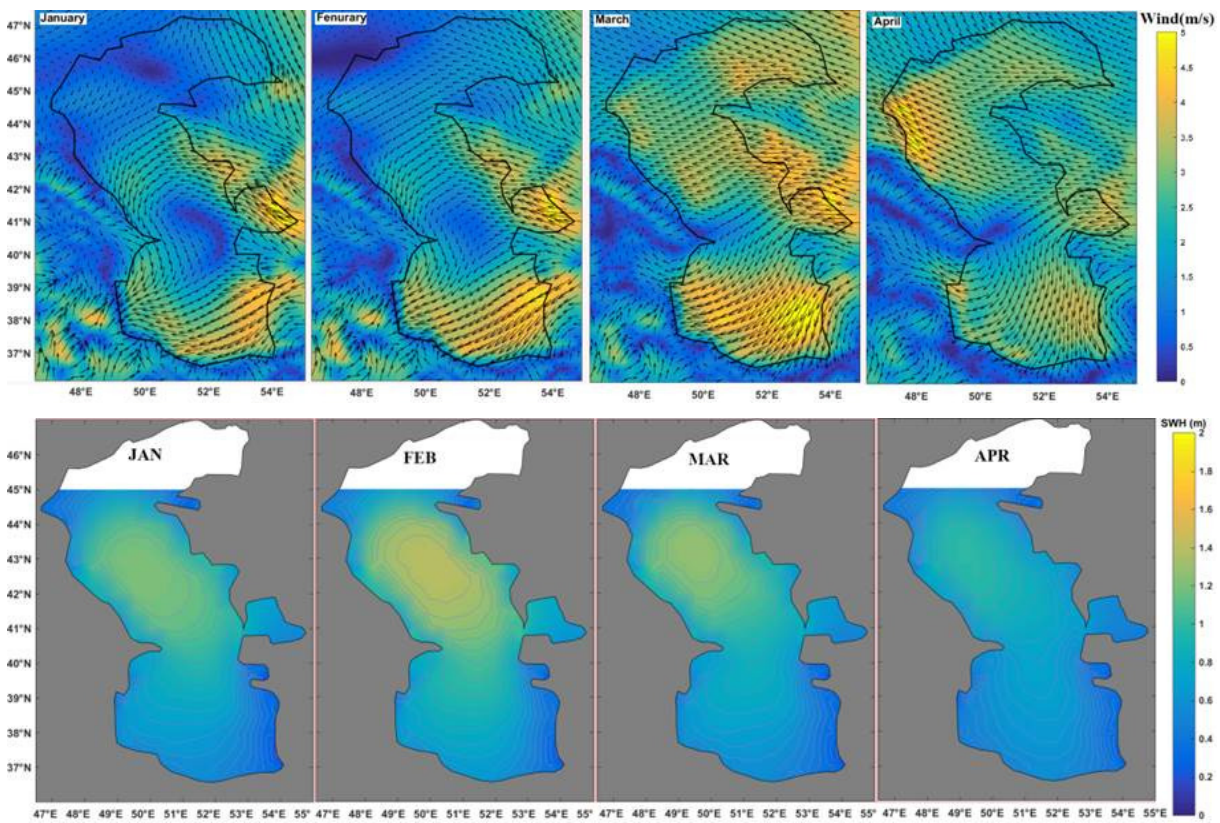


ژانویه روی می‌دهد؛ زیرا در این ماه بادهای مداوم از سمت شمال و شمال شرقی می‌وزند و به دلیل طول بادگیر زیاد باعث رشد موج و تداوم آن‌ها و شکل‌گیری امواج دورآ می‌شود.

حدود ۴-۵ متر بر ثانیه اتفاق افتاده است. در این ماه باد غالب در خزر شمالی و میانی از سمت شرق و شمال شرق می‌وزند و در خزر جنوبی دارای جهت شمالی و شمال شرقی است. اما بیشینه متوسط ارتفاع موج شاخص، حدود ۱/۵ متر، در ماه



شکل ۲. سری زمانی ارتفاع موج شاخص در موقعیت بندر امیرآباد

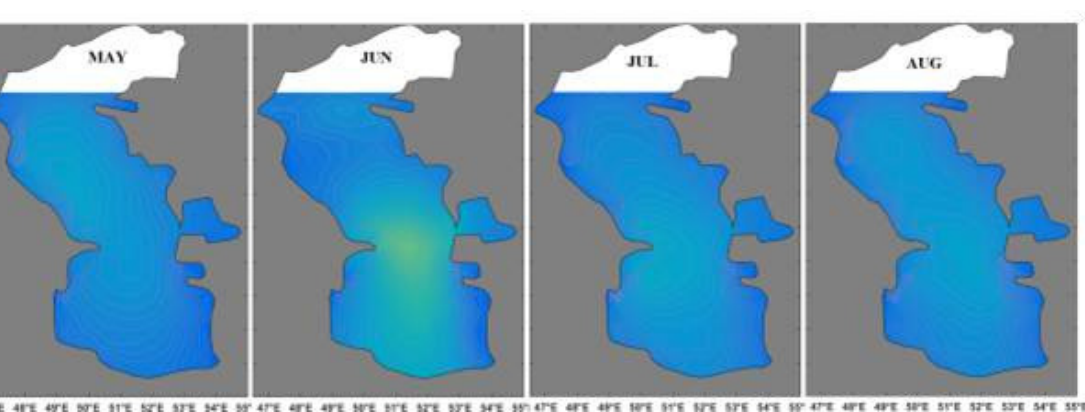
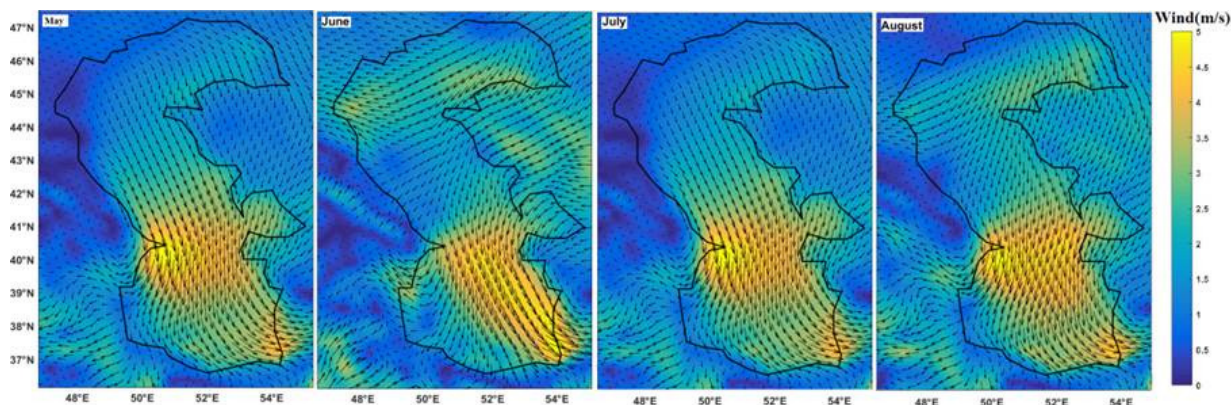


شکل ۳. میانگین باد سطحی (شکل‌های بالا) و امواج ناشی از آن (شکل‌های پایین) در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل در دریای خزر

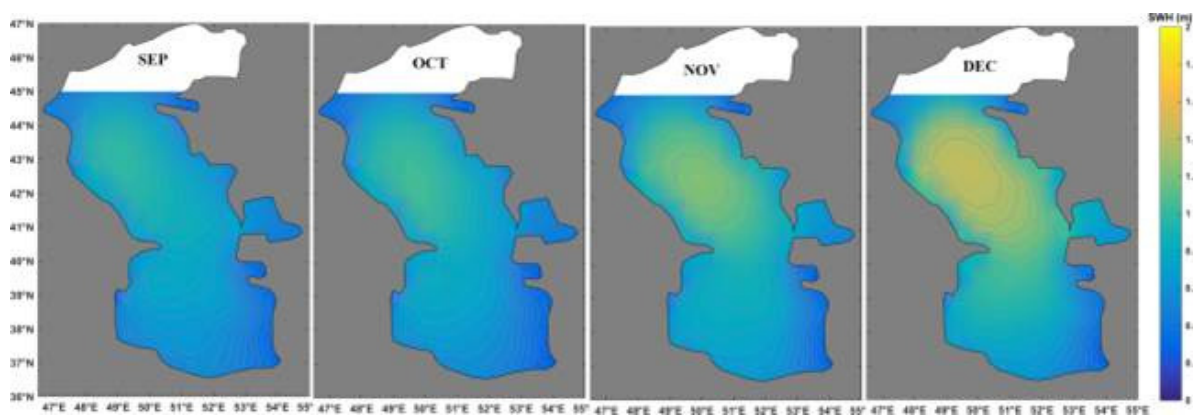
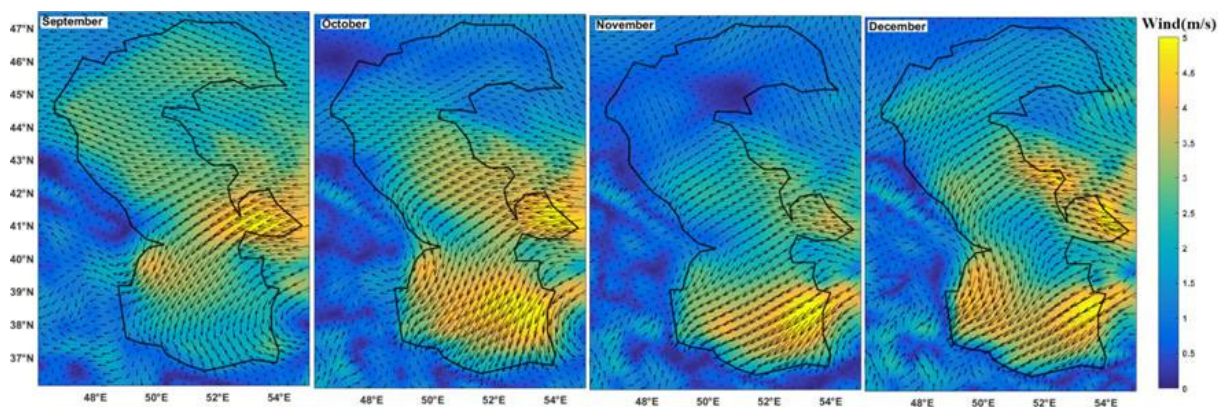
در آخر نیز سرعت باد میانگین از سپتامبر تا دسامبر در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۰ آورده شده است. در این ماه‌ها سرعت باد میانگین علاوه بر خزر جنوبی در خزر میانی و شمالی نیز تا حدود ۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد و ارتفاع موج شاخص میانگین در دسامبر به دلیل تغییر جهت باد از سمت شرقی به شمالی تا ۲ متر بیشینه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۴ آمده است، در ماه‌های می، جون، جولای و آگوست میانگین سرعت باد، در حدود ۵ متر بر ثانیه، در خزر جنوبی بیشتر از خزر میانی و شمالی است و بیشتر جهت شمالی دارند. در این بین در ماه ژوئن متوسط ارتفاع موج شاخص، با مقدار بیشینه حدود ۱ متر، بیشتر از دیگر ماه‌هاست.





شکل ۴. میانگین باد سطحی (شکل‌های بالا) و امواج ناشی از آن (شکل‌های پایین) در ماه‌های می، جون، جولای و آگوست در دریای خزر



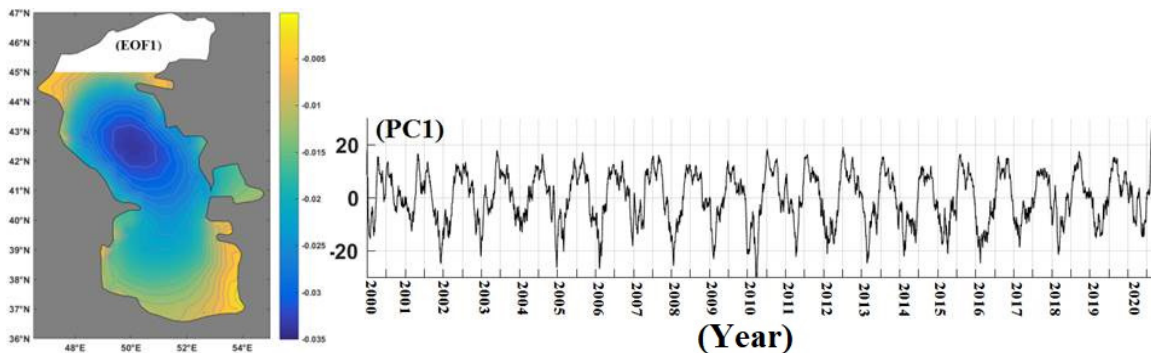
شکل ۵. میانگین باد سطحی (شکل‌های بالا) و امواج ناشی از آن (شکل‌های پایین) در ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر در دریای خزر

می‌کنند. مؤلفه دوم آنومالی (EOF2) و سری زمانی آن (PC2) که حدود ۲۰ درصد از کل آنومالی را تشکیل می‌دهد، در شکل ۷ آورده شده است. این مؤلفه می‌تواند الگوهای امواج ناشی از بادهای محلی را تفسیر نماید. در خزر جنوبی این امواج حاصل توفان‌های محلی در نزدیکی شبه جزیره آبخوران در نزدیکی کشور آذربایجان است. این منطقه تحت تأثیر الگوی باد محلی حاصل از کوه‌های قفقاز قرار می‌گیرد. در مرز خزر شمالی و مرکزی نیز این آنومالی حاصل بادهای غالب شمالی است که در مناطق کم عمق شکل می‌گیرند. الگوی غالب سوم (EOF3) که کمتر از ۵ درصد از کل آنومالی را نشان می‌دهد. حاصل بادهای محلی شمال غربی در نزدیکی شهر ماخاچکلاهی روسیه و بادهای شرقی در نزدیکی بیابان قره‌قوم در سمت شرقی دریای خزر است. بنابراین از این روش می‌توان با دقت بالایی بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی در سواحل دریای خزر و ایستگاه‌های هواشناسی علاوه بر سامانه‌های جوی غالب عوامل محلی تأثیرگذار در این الگوها را به شکل دقیق مورد مطالعه قرار داد. این موضوعی برای مطالعات بعدی خواهد بود.

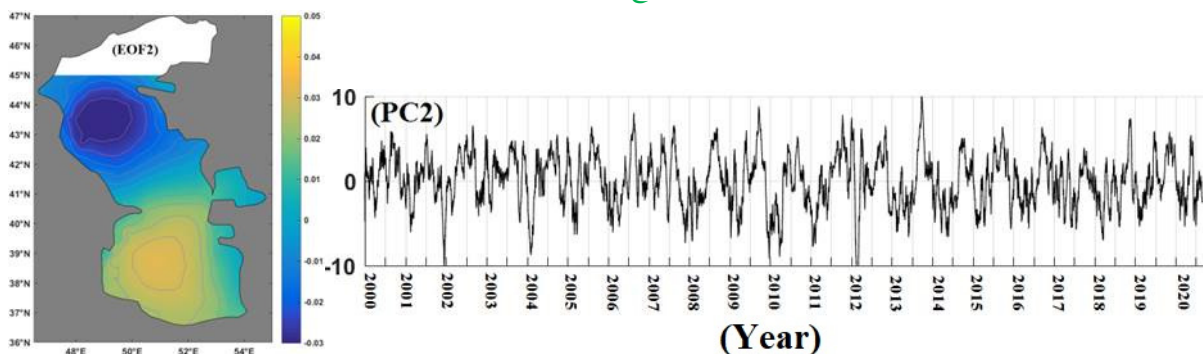
چنان که در شکل‌های ۳ تا ۵ می‌بینید، ارتفاع موج شاخص میانگین در خزر میانی و جنوبی غالباً در محدوده ۱ تا ۲ متر قرار دارد. بیشینه مقدار آن حدود ۲ متر در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه و کم‌ترین مقدار آن حدود ۴۰ سانتی‌متر نیز در ماه‌های می، جولای و آگوست اتفاق می‌افتد.

همان‌طور که در بالا اشاره شد روش توابع متعامد برای به دست آوردن درصد الگوهای غالب پدیده‌ها در مناطق مختلف در علوم جوی و اقیانوسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه اعمال این روش بر روی ارتفاع موج شاخص در دریای خزر در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. مؤلفه اول این تجزیه (EOF1) حدود ۷۰ درصد از کل آنومالی ارتفاع موج شاخص را در دریای خزر نشان می‌دهد. این الگوی غالب اصلی امواج ناشی از باد در دریای خزر است (شکل ۶). سری زمانی این آنومالی (PC1) نشان می‌دهد، شدت آن در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ بیشتر از دیگر سال‌ها بوده است.

الگوی باد غالب بر حوزه‌های دریایی می‌تواند در اثر پستی و بلندی ساحلی تغییر نماید و الگوهای محلی در اثر تغییرات دمایی خشکی و دریا شروع به شکل گرفتن

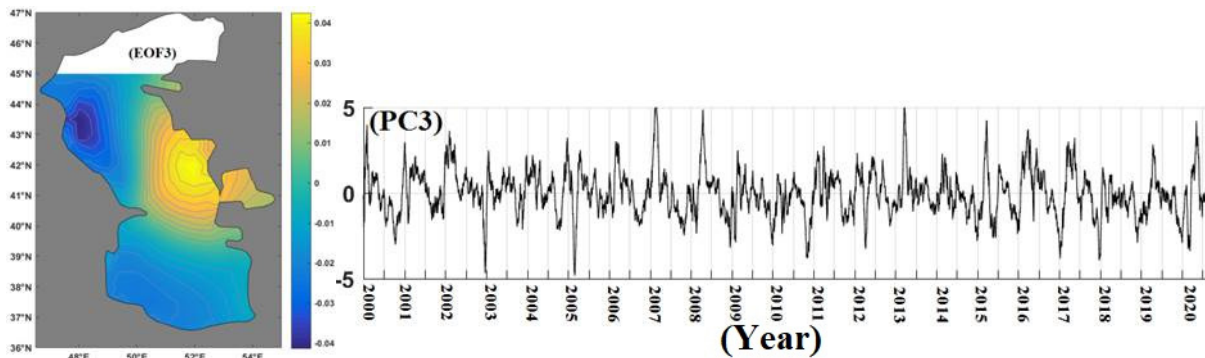


شکل ۶. مؤلفه اول (EOF1) آنومالی موج شاخص و سری زمانی آن (PC1) در دریای خزر



شکل ۷. مؤلفه دوم (EOF2) آنومالی موج شاخص و سری زمانی آن (PC2) در دریای خزر





شکل ۸. مؤلفه سوم (EOF3) آنومالی موج شاخص و سری زمانی آن (PC3) در دریای خزر

مقیاس کوچک است که بیشتر در نزدیکی شبه جزیره آبشوران شکل می گیرند و مد سوم (EOF3) نیز حدود ۵ درصد از آنومالی کل است که در نتیجه بادهای محلی شمال غربی در نزدیکی شهر ماخاچکلاهی روسیه و بادهای شرقی در نزدیکی بیابان قره قوم در سمت شرقی دریای خزر ایجاد می شود. این الگوها با الگوی باد سطحی روی دریای خزر هم خوانی دارد و تأییدی بر درستی الگوی کلی امواج ناشی از باد در این حوزه آبی است [۲۱]. بنابراین بر اساس روش توابع متعامد می توان با جزئیات به بررسی باد سطحی محلی و امواج ناشی از آن پرداخت.

#### ۶. سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی در قالب طرح پژوهشی به شماره ۰۱-۰۳۹-۰۱-۰۳۱-۰۳۹۶ انجام شده است. از پشتیبانی مادی و معنوی صورت گرفته کمال تقدیر و تشکر را داریم.

#### مراجع

- [1] Holthuijsen LH. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge university press; 2010 Feb 4.
- [2] Janssen PA. Progress in ocean wave forecasting. Journal of Computational Physics. 2008 Mar 20;227(7):3572-94.
- [3] Özger M. Neuro-fuzzy approach for the spatial estimation of ocean wave characteristics. Advances in Engineering Software. 2009 Sep 1;40(9):759-65.
- [4] Björkqvist JV, Vähä-Piikkiö O, Alari V, Kuznetsova A, Tuomi L. WAM, SWAN and WAVEWATCH III in the Finnish archipelago—the effect of spectral performance on bulk wave

#### ۵. بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش پس از تعیین شبکه محاسباتی نامنظم مناسب و ریز شدن شبکه در مناطق ساحلی به ویژه در سواحل بندر انزلی، نوشهر و امیرآباد، ضریب رشد موج و ضریب استهلاک انرژی با سفیدک موج در یک دوره حدود ۶ ماهه با استفاده از مدل SWAN مورد ارزیابی قرار گرفت. حالت بهینه این ضرایب به ترتیب ۱۰۰ و ۰/۰۰۰۱۳۶ در دریای خزر تعیین شد. در این ارزیابی از داده های باد سطحی Era-Interim، پستی و بلندی بستری GEBCO استفاده شده است.

در مرحله بعد، علاوه بر سرعت میانگین باد سطحی، میانگین ارتفاع موج شاخص در یک دوره ۲۰ ساله مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی ها نشان می دهد ارتفاع موج شاخص میانگین در خزر میانی و جنوبی غالباً در محدوده ۱ تا ۲ متر قرار دارد. بیشینه مقدار آن در ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه؛ کمترین مقدار نیز در ماه های می، جولای و آگوست مشاهده شد.

در نهایت، برای به دست آوردن الگوهای غالب امواج ناشی از باد در دریای خزر از روش تحلیل مؤلفه های اصلی (EOFs) استفاده شد. نتایج این تحلیل نشان می دهد سه مد اول می تواند حدود ۹۰ درصد از آنومالی کل امواج ناشی از باد را در دریای خزر تفسیر نماید. مد اول (EOF1) نزدیک به ۷۰ درصد از آنومالی کل را نشان می دهد. بر اساس مطالعه قبلی این آنومالی می تواند نتیجه حاصل شکل گیری سیکلون ها، توفان ها و تداوم آن ها در قسمت مرکزی و شمالی خزر باشد. مد دوم (EOF2) که حدود ۲۰ درصد از کل آنومالی را برآورد می کند حاصل توفان های محلی در

- [۱۷] کیمیجانی فرشته، صدری نسب مسعود، چگینی وحید، سیادت موسوی سید مصطفی. شبیه سازی امواج در جنوب دریای خزر با به کارگیری میدان باد ECMWF (ERA-Interim) و مقایسه با نتایج ISWM II. نشریه علمی پژوهشی اقیانوس شناسی. ۱۳۹۴؛ ۶ (۲۳): ۷۷-۸۵.
- [۱۸] دردی زاده بصیرآباد احمد، چگینی وحید، مهدی زاده محمد مهدی، کامران زاد بهاره. بررسی انرژی امواج در بندر امیرآباد دریای خزر با استفاده از نتایج مدل SWAN. مجله علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۲؛ ۱۳ (۲): ۷۱-۸۰.
- [19] Rajabi S, Chegini V, Lari K, Kamranzad B, Hosseini ST. Numerical Modeling of Wind Wave in the Anzali Using SWAN Model. *Journal of Oceanography*. 2013;4(15):83-92.
- [20] Schmidt OT, Mengaldo G, Balsamo G, Wedi NP. Spectral empirical orthogonal function analysis of weather and climate data. *Monthly Weather Review*. 2019 Aug;147(8):2979-95.
- [21] 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.
- [22] Hannachi A, Jolliffe IT, Stephenson DB. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007 Jul;27(9):1119-52.
- [23] Sundar V. *Ocean wave mechanics: Applications in marine structures*. John Wiley & Sons; 2017 Feb 13.
- [۲۴] فرجامی حسین، حسینی سیدطالب، چگینی وحید، محمدی سیده سعیده. شبیه سازی امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با مدل عددی سوان. نشریه علمی-پژوهشی اقیانوس شناسی. ۱۳۹۰؛ ۲ (۸): ۷۹-۸۷.
- [۲۵] مظاهری سعید، حاجی ولیی فاطمه، کامران زاد بهاره. تهیه اطلس امواج خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر. گزارش طرح پژوهشی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی. ۱۳۹۲. ۷۴ صفحه.
- parameters. *Journal of Operational Oceanography*. 2020 Jan 2;13(1):55-70.
- [5] Jena BK, Rajkumar J, Avula AK, Joseph KJ, Murthy MR. Simulated wave climate and variability over the North Indian Ocean. *Current Science*. 2020 Jun 10;118(11):1746.
- [6] Patin SA. *Environmental impact of the offshore oil and gas industry*. East Northport, NY: EcoMonitor Pub.; 1999. Vol. 425
- [7] Daskalov GM, Mamedov EV. Integrated fisheries assessment and possible causes for the collapse of anchovy kilka in the Caspian Sea. *ICES Journal of Marine Science*. 2007 Apr 1;64(3):503-11.
- [8] Barannik V, Borysova O, Stolberg F. The Caspian Sea region: environmental change. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2004 Feb;33(1):45-51.
- [9] Akiner S. *The Caspian: politics, energy and security*. Routledge; 2004 Jul 5.
- [10] Onn I. Three centuries at the Caspian (The Synchronism of Major Historical Events of XVIII–20 cc.). Moscow; 2000: p. 1-72.
- [11] Zimnitskaya H, Von Geldern J. Is the Caspian Sea a sea; and why does it matter?. *Journal of Eurasian studies*. 2011 Jan;2(1):1-4.
- [12] Chang CP, Harr PA, Chen HJ. Synoptic disturbances over the equatorial South China Sea and western Maritime Continent during boreal winter. *Monthly Weather Review*. 2005 Mar 1;133(3):489-503.
- [13] 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.
- [14] Ghader S, Montazeri-Namin M, Chegini F, Bohluly A. Hindcast of surface wind field over the Caspian Sea using WRF model. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures*; 2014 Nov 24-26; Tehran, Iran.
- [15] Mahmoodi R, Ardalan AA, Hasanlou M. Wind wave numerical modeling in the Caspian sea. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017 Sep 26;42(4/W4).
- [16] Marchigiani R, Gordy S, Cipolla J, Adams RC, Evans DC, Stehly C, et al. Wind disasters: A comprehensive review of current management strategies. *International journal of critical illness and injury science*. 2013 Apr;3(2):130.

## پی نوشت

1. Simulating Wave Near-shore
2. U.S. Navy Standard Surf Model

3. The Copernicus Climate Change Service
4. The General Bathymetric Chart of the Oceans
5. International Hydrographic Organization
6. Biass
7. Correlation Coefficient
8. Mean Square Error
9. Scatter Index