

(مقاله پژوهشی)

## امواج ناشی از باد در دریای خزر جنوبی

مریم سیوف جهرمی<sup>۱</sup>، حامد سام دلیری<sup>۲</sup>

soyufjahromi@yahoo.com.au

۱. استادیار فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس  
 ۲. دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

## چکیده

امواج نقش مهمی در وضعیت هندسی و ترکیب سواحل بازی می‌کنند. ایران ۷۰۰ کیلومتر خط ساحلی با دریای خزر دارد که شناخت امواج آن حائز اهمیت است. این مطالعه با بازبینی منابع، شناخت جامع و تحلیلی از امواج خزر ارائه می‌دهد، به طوری که امواج خزر، باد رانده، و موج غالب خزر جنوبی را ابتدا امواج غربی و سپس امواج شمالی (با بیشینه ارتفاع ۵/۵۷ m) مطرح می‌سازد. ارتفاع موج بیشینه تحت تاثیر تعداد امواجی که به منطقه می‌رسند، تصادفی است و شکست امواج بیشتر از نوع شکنای آشفته است. الگوی دقیق میدان باد (در ارتفاع موج‌های ۰/۵-۱/۵ m)، و ابعاد حوضه تحت وزش باد در شکل‌گیری امواج تاثیر دارد. از بین روش‌های مختلف شبیه‌سازی (SMB, SPM, CEM, JONSWAP, مدل MIKE21 (بسته SW)، روش درختان تصمیم رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی) که در مطالعات مختلف دیده می‌شود، دو روش آخر با جواب‌هایی نزدیک به هم، دارای دقت دوبرابر هستند، اگرچه این دو روش آخر، ارتفاع امواج ناشی از باد را کمی پایین دست و دوره تناوب موج را کمی بالا دست نسبت به اندازه‌گیری خزر جنوبی تخمین می‌زنند.

واژگان کلیدی: دریای خزر، پیش‌بینی امواج ناشی از باد، خزر جنوبی

10.22034/IJMST.2021.44754  
 20.1001.1.17355346.1400.25.1.4.4



تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۲۲

صص ۶۳-۵۲

## مقدمه

امواج آب از آشکارترین پدیده‌های تقریباً دائمی بر روی سطح هر حوضه آبی نظیر تالاب‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، مخازن پشت سدها، خلیج‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها هستند و معمولاً به صورت نوسان سطحی رویه سیال تعریف می‌شوند [۱]. بررسی امواج، نخستین قدم برای هر گونه مطالعه و فعالیت در راستای شناخت عوامل تأثیرگذار بر رفتار و شرایط موجود در دریا است. در مناطق ساحلی، امواج نقش مهمی در تعیین هندسه و شکل سواحل بازی می‌کنند [۲]. ارتفاع امواج، دریا ضمن این که نخستین احساس را نسبت به رخداد موج به وجود می‌آورد، مهمترین پارامتر در همه مسائل مطرح در مطالعات مهندسی سواحل است. در طراحی سازه‌های دریایی نظیر سکوها، موج‌شکن‌ها و اسکله‌ها اصلی‌ترین پارامتر در تعیین پایداری و طرح اجزای مختلف آن‌ها، ارتفاع امواج منطقه است [۳]. امواج وقتی به نواحی ساحلی نزدیک می‌شوند، به دلیل وقوع پدیده‌های مختلف نظیر کم عمقی، تفرق، انعکاس و تغییر شکل می‌یابند که از جنبه‌های مختلف نظیر مدیریت، حفاظت و بهره برداری از سواحل، محیط زیست، شیلات، دریانوردی، ساخت سازه و غیره حائز اهمیت می‌شوند [۴]. امواج مهم‌ترین پدیده در طراحی سازه‌های کرانه‌ای و برون کرانه‌ای است [۵]. مطالعه امواج دریا در نواحی دور از ساحل و نزدیک ساحل، موجب توسعه دانش بنیادی در زمینه مهندسی سواحل و فیزیک دریا و امواج، می‌شود. در مناطق نزدیک ساحل،

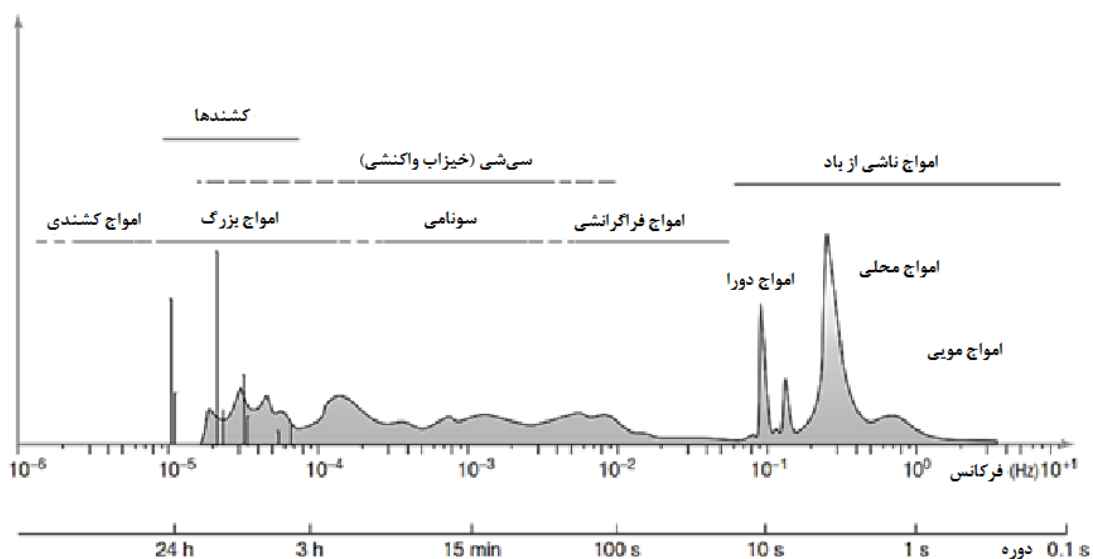
تعیین الگوی امواج و جریان‌های ساحلی مهمترین ویژگی‌هایی هستند که در جهت شناخت عوامل تأثیرگذار بر محیط‌های دریایی و نواحی ساحلی و سازه‌های ساحلی مطرح می‌شوند [۶]. هندسه و شکل ساحل، رسوب‌گذاری و فرسایش و بسیاری دیگر از پدیده‌های فیزیکی و دینامیکی تحت تأثیر مستقیم امواج و جریان قرار دارند [۲].

متداول‌ترین تقسیم‌بندی امواج دریا بر اساس دوره موج یا بر اساس طول موج آن است (جدول ۱ و شکل ۱).

جدول (۱) تقسیم‌بندی امواج دریا بر اساس دوره موج [۷]

دسته‌بندی امواج	محدوده دوره تناوب	نیرو تولیدکننده	بازگرداننده
مویی	$> 1s$	کشش سطحی	باد
فراگرانشی	$1s - 18s$	کشش سطحی و گرانش	باد
گرانشی	$18s - 20s$	گرانش	باد و باد و
فروگرانشی	$20s - 5min$	گرانش	گرادیان‌های فشار جوی
امواج با دوره تناوب بلند	$5min - 12h$	گرانش	گرادیان‌های فشار جوی و زلزله
کشندی معمولی	$12h - 24h$	گرانش و نیروهای	جاذبه گرانشی
فرا کشندی	$> 24h$	کریولیس	طوفان و جاذبه گرانشی

مقیاس انرژی دلخواه



شکل (۱) فرکانس و دوره انواع امواج دریا [۸].

SWAN و WAM [۲۴-۲۶]، Wavewatch III [۲۴] و [۲۷-۲۸] و محاسبات نرم (مانند شبکه عصبی مصنوعی [۲۹]، سیستم استنباط فازی [۳۰]، درخت تصمیم‌گیری [۳۱] و الگوریتم ژنتیک [۳۲]) استفاده می‌شوند که در این مطالعه، به بررسی مطالعات دسترس در زمینه تعیین مشخصات امواج ناشی از باد در دریای خزر پرداخته شده است و بهترین روش در آن حوضه استخراج گردیده است.

### منطقه مورد مطالعه

دریاچه خزر بزرگترین دریاچه دنیاست که از زمان‌های گذشته به علت وسعت زیاد آن (۶/۵ برابر دریاچه «آرال»<sup>۱</sup>، ۱۳ برابر دریاچه «بایکال»<sup>۲</sup>، و پوشاندن همه سطح خشکی‌های آسیای جنوب باختری در زمان‌های قدیم) دریا خوانده می‌شده است. دریای خزر یا دریای کاسپین<sup>۳</sup> از شمال به روسیه، از جنوب به ایران، از غرب به جمهوری آذربایجان و از شرق به جمهوری‌های ترکمنستان و قزاقستان محدود می‌شود، به عبارتی به ترتیب از جنوب و شمال به عرض جغرافیایی  $33^{\circ}36'N$  الی  $57^{\circ}47'N$  و از غرب و شرق نیز به طول جغرافیایی  $43^{\circ}46'E$  الی  $53^{\circ}54'E$  محدود می‌شود (شکل ۲). طول دریای خزر حدود ۱۰۳۰ km و عرض آن از ۱۹۶ تا ۴۳۵ km متغیر است [۳۳]. از نظر توپوگرافی، این دریاچه بسیار متغیر است به طوری که با توجه به ناهمواری‌های بستر، به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود [۳۴] (شکل ۲). تنگه آبشوران حوزه جنوبی را از دو حوزه دیگر متمایز می‌کند. حداکثر عمق دریا در خزر شمالی ۲۰ m است اما در خزر جنوبی، نزدیک سواحل ایران، طبق داده‌های GEBCO با قدرت تفکیک نیم دقیقه‌ای، به ۱۰۲۵ m می‌رسد [۳۵]. حوزه خزر شمالی حدود یک درصد [۳۶] و حوزه خزر جنوبی حدود ۶۴٪ [۳۶] (دو سوم) آب خزر را در خود جای داده است. شبکه رودخانه‌ای اطراف خزر، بسیار نامنظم است. تمام رودخانه‌های اصلی در خزر شمالی یا سواحل غربی آن وجود دارند (شکل ۳).

امواج ناشی از باد، عمده‌ترین امواج مشاهده شده در دریا هستند و بیشترین اثر را بر فعالیت‌های بشری در محیط‌های دریایی دارند و به همین دلیل هنگامی که بحث پیش‌بینی امواج جهت مقاصد مهندسی پیش می‌آید، عمدتاً امواج ناشی از باد مدنظر هستند [۹]. اگرچه اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق‌ترین روش برای دستیابی به پارامترهای امواج هر منطقه است، اما هنگامی که تعیین امواج در منطقه‌ای وسیع مدنظر باشد، روش اندازه‌گیری میدانی به تنهایی قادر به پاسخگویی نخواهد بود [۱۰].

در دریای خزر نیز همانند دیگر حوضه‌های آبی، عوامل مختلفی سبب ایجاد موج می‌شوند. با توجه به محصور بودن دریای خزر، نیروی کشندی در آن بسیار کم و در محدوده چند سانتی‌متر است [۱۱]. بنابراین تأثیر قابل توجهی در گردش آن ندارد و تغییرات گردش دریای خزر، بیشتر تحت تأثیر عوامل دیگر، به ویژه باد است. جریان‌های ناشی از باد در لایه سطحی و جریان‌های گرما شوری در ستون قائم آب، گردش ایجاد می‌کنند [۱۲]. وزش باد دائمی ویژگی این حوضه آبی است که سبب می‌شود، اهمیت این عامل در ایجاد امواج، بیشتر از عوامل دیگر باشد. در حقیقت، فراوانی نفوذ سامانه‌های پرفشار قوی نظیر سامانه پرفشار سبیری و نیز پرفشارهای قطبی و یا پرفشارهای با منشاء اقیانوس اطلس در فصول سرد سال، غالباً سبب وزش باد شدید می‌شود که معمولاً با تلاطم زیاد و امواج مرتفع همراه است [۲].

امروزه استفاده از مدل‌های عددی به عنوان ابزاری کارآمد جهت شبیه‌سازی و سپس بررسی فرایندهای پیچیده طبیعی، رهگشای بسیاری از مسائل فنی و مهندسی از جمله وضعیت دریا است. با توجه به قابلیت‌های مدل‌های ریاضی، انجام مطالعات کافی و اصولی، به کمک شبیه‌سازی عددی در مناطق ساحلی ضروری به نظر می‌رسد. اهمیت موضوع فوق باعث شده که متخصصان در پی اجرای مدل‌های عددی، روی حوزه‌های کوچک و وسیع آبی باشند [۱۰].

همانگونه که بیان گردید، از آنجایی که پیش‌بینی پارامترهای امواج برای طراحی سازه‌های ساحلی و انجام عملیات دریایی، ضروری است، لذا روش‌های مختلفی چون روش‌های تجربی (مانند SPM [۱۳-۱۵]، SMB [۱۶-۱۷]، CEM [۸]، [۱۸] و Donelan [۱۹-۲۱])، مدل‌های عددی (مانند MIKE21 [۲۲-۲۳])،

<sup>1</sup> Aral

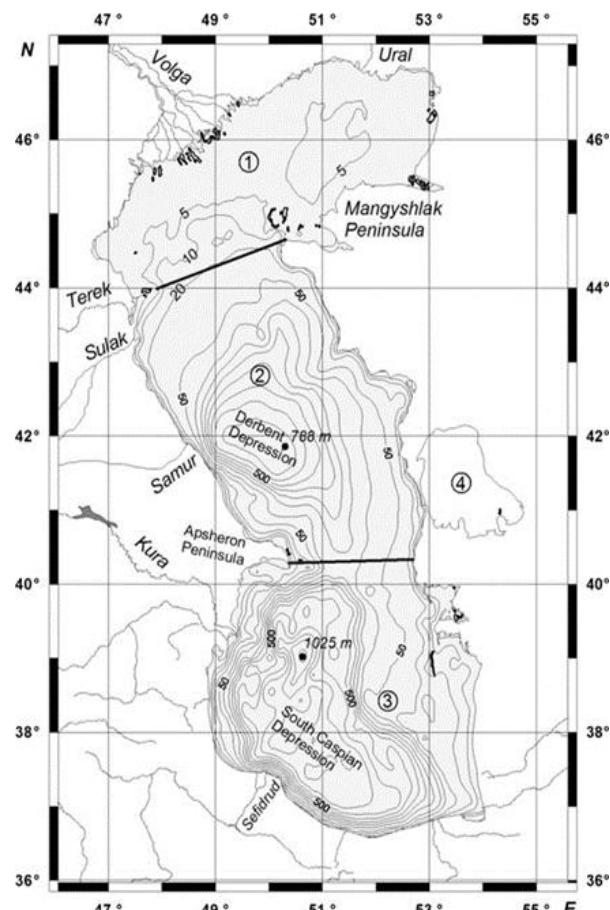
<sup>2</sup> Baikal

<sup>3</sup> Caspian Sea

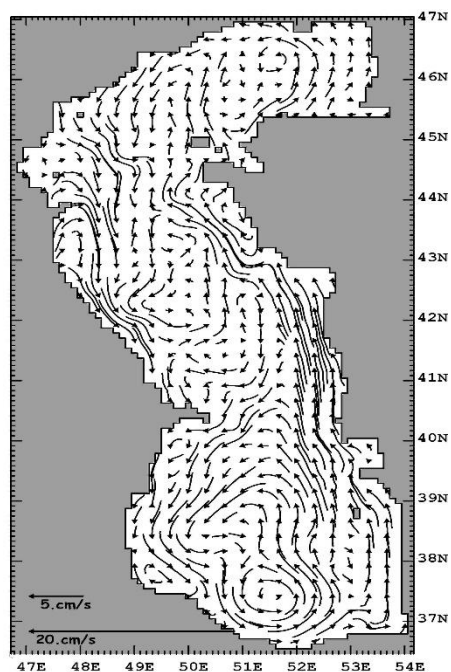
رواناب متوسط سالانه این رودخانه‌ها (ولگا، اورال، ترک و کورا)، حدود ۹۰٪ کل رواناب همه رودخانه‌های داخلی خزر است. باقی رواناب مربوط به رودخانه‌های ایرانی و بخش ساحل غربی دریای خزر می‌باشد. موقعیت جغرافیایی عرض میانی، تغییرات فصلی شدیدی را در شار گرمایی و آب شیرین در همه سطح دریای خزر ایجاد می‌کند.

به طور متوسط، دریای خزر حدود ۴۰۰ مگا ژول بر مترمکعب، در ژانویه گرما از دست می‌دهد که برابر با مقدار گرمای جذب شده از جو در ماه ژوئن است [۳۴].

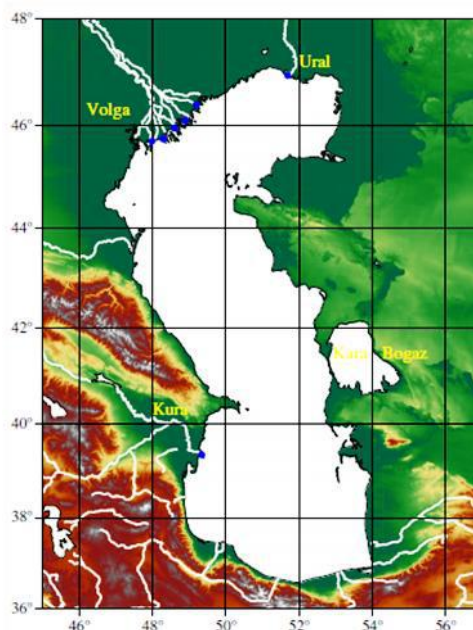
در خزر میانی، در طول سال، یک سامانه دو قطبی شامل یک گردش پادساعتگرد در قسمت شمال غربی آن و یک گردش ساعتگرد در قسمت جنوب شرقی آن وجود دارد. یک سامانه دو قطبی مشابه نیز در خزر جنوبی وجود دارد؛ که به شکل ساعتگرد در شمال غربی حوضه واقع شده است. در حالی که ناحیه پادساعتگرد سامانه در جنوب شرقی است. به ویژه، در دوره زمستان گردش پادساعتگرد در خزر میانی و گردش ساعتگرد در خزر جنوبی بسیار شدید است، در حالی که در دوره تابستان، برعکس، ساعتگرد در خزر میانی و پادساعتگرد در خزر جنوبی بیشترین قدرت را دارند [۱۱، ۳۸-۳۷]. موارد ذکر شده در شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است.



شکل (۲) توپوگرافی پایین دریای خزر (برحسب متر). دریای خزر شمالی (۱)، میانه (۲)، جنوبی (۳)، خلیج کارا بوگاز (۴) [۳۴].



شکل (۴) الگوی چرخش خزر در فصل زمستان (ماه دسامبر) [۳۹].

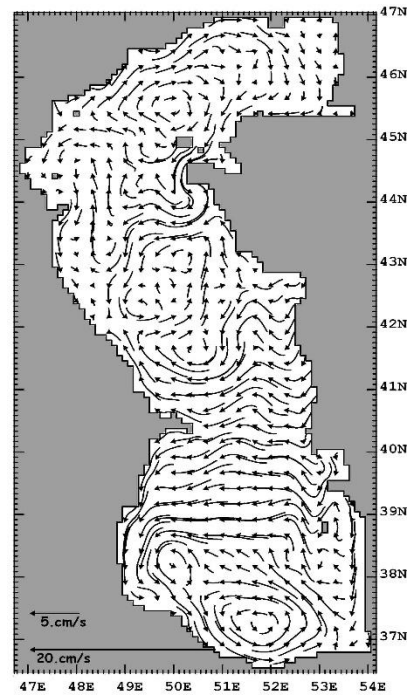


شکل (۳) رودخانه‌های اصلی دریای خزر [۳۴].

در نهایت به کمک اطلاعات اندازه‌گیری شده میدانی ژرفاسنجی و مشخصات امواج در سه ایستگاه رستمرود، نور و رویان، شکست امواج منطقه خزر جنوبی از نوع آشفته معرفی شده است [۴۰].

جدول (۲) جهت موج غالب و حداکثر ارتفاع که با استفاده از روش SBM در یک دوره آماری ۱۵ ساله (۱۹۸۵-۲۰۰۰) در خزر جنوبی استخراج شده است [۴۰].

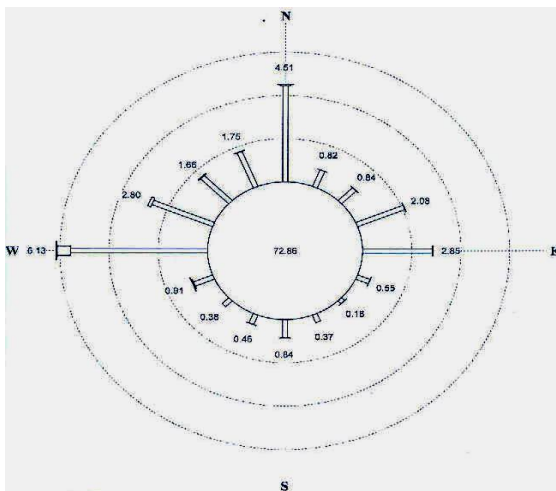
فصل	جهت موج		حداکثر ارتفاع موج (m)
	اول (غالب)	دوم	
بهار	غربی	شرقی	۴/۶
تابستان	شمالی	غربی	۴/۳۵
پائیز	شمالی	شمال غربی	۳/۰۱
زمستان	غربی	شمالی	۴/۵۸
سالیانه	غربی	شمالی	۴/۳۹



شکل (۵) الگوی چرخش خزر در فصل تابستان (ماه آگوست) [۳۹].

### امواج ناشی از باد دریای خزر

امواج ناشی از باد، مهمترین نوع امواج منطقه مورد مطالعه است. طبق اطلاعات سه ساعته باد در یک دوره ۱۵ ساله (۱۹۸۵-۲۰۰۰) از ایستگاه‌های سینوپتیک نوشهر و بابلسر، و توپوگرافی منطقه و استفاده از روش SBM، الگوی امواج منطقه در فصول مختلف سال، (جدول ۲) نشان می‌دهد که در فصل بهار جهت موج غالب، در جهت غربی و پس از آن جهت شرقی، حائز اهمیت است و حداکثر ارتفاع موج ۴/۶ m در جهت غربی می‌باشد. در فصل تابستان جهت موج غالب، شمالی و بعد از آن جهت غربی دارای اهمیت است و حداکثر ارتفاع موج ۴/۳۵ m در جهت شمال می‌باشد. در فصل پائیز جهت موج غالب، شمالی و حداکثر ارتفاع موج ۳/۰۱ m در جهت شمال می‌باشد. جهت موج غالب در فصل زمستان، غربی و بعد از آن جهت شمالی دارای اهمیت است (جدول ۲). حداکثر ارتفاع موج به میزان ۵/۵۸ m در جهت غربی است. در میانگین سالیانه برای گلموج منطقه مورد مطالعه، امواج غربی غالب و بعد از آن امواج شمالی دارای اهمیت می‌باشند (شکل ۶). حداکثر ارتفاع میانگین سالیانه امواج در جهت غربی به میزان ۴/۳۹m و میزان وقوع امواج آرام به‌طور سالیانه در منطقه مورد مطالعه ۷۲/۸۶ درصد است.



شکل (۶) گلموج سالانه خزر جنوبی با استفاده از روش SBM و داده‌های ۱۵ ساله [۴۰].

همچنین در مطالعه خصوصیات باد، جریان و موج در سواحل جنوبی دریای خزر به کمک داده‌های میدانی سه ساعته (بازه زمانی ۲۰۱۰/۰۳/۰۱ تا ۲۰۱۱/۰۵/۰۱)، حاصل از اندازه‌گیری بویه دو ایستگاه اندازه‌گیری در سواحل گیلان و مازندران (ایستگاه‌ها کیانشهر و نوشهر) نشان داده شده است که ارتفاع موج بیشینه یک متغیر تصادفی است که تعداد موج‌ها در تعیین توزیع آن بسیار تاثیرگذار است [۲]. همبستگی مثبت و معناداری بین



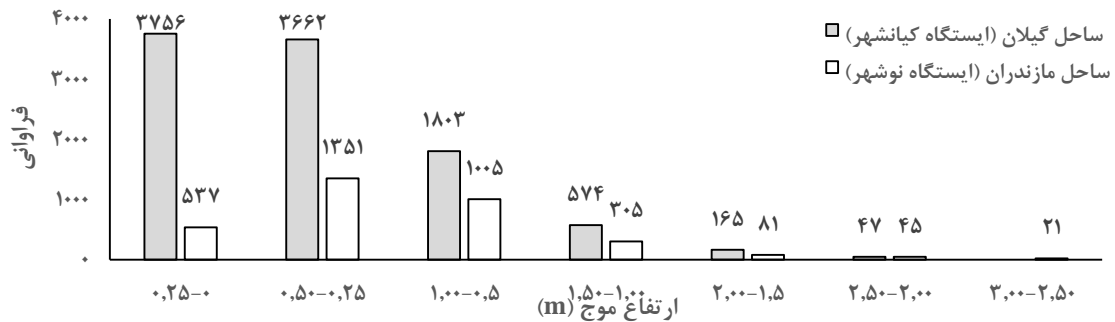
منطقه روش شبکه‌های عصبی اندکی بهتر از درخت‌های رگرسیونی، ارتفاع و پریود امواج را پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین می‌توان گفت درخت‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی در دریای خزر ارتفاع امواج ناشی از باد را اندکی دست پایین و پریود امواج را کمی دست بالا تخمین زده‌اند [۴۱].

با استفاده از داده‌های باد شش ساعته ECMWF<sup>۱</sup> در ارتفاع ۱۰ متری و قدرت تفکیک فضایی ۱/۵ درجه طول و عرض جغرافیایی کل حوزه دریای خزر در مدل طیفی- عددی نسل سوم SWAN شبیه‌سازی شده است [۴۳]. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه منابع انرژی قابل توجهی از باد در محیط ساحلی دریای خزر موجود است اما با انرژی موج ارتباط منطقی ندارد و در نتیجه دریای خزر (به ویژه بخش شمالی آن که آب بسیار کم عمق است) محیط مناسبی برای استخراج مؤثر انرژی باد برای توربین‌های مزارع بادی است. در شبیه‌سازی مجدد حوضه با استفاده از مدل SWAN [۴۴]، با شبکه‌بندی نامنظم و داده‌های خروجی از مدل تودرتوی WRF، و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری بویه ایستگاه انزلی و فراساحل (آگوست ۲۰۱۱) دیده شد که مدل WRF دقت مناسبی برای داده‌های ورودی مدل SWAN به ویژه در نزدیکی ساحل بندر انزلی (شکل ۸) دارد [۴۵].

سرعت باد حاصل از اندازه‌گیری بویه و ایستگاه‌های سینوپتیک ساحلی وجود دارد اما این همبستگی در جهت باد دیده نمی‌شود که می‌تواند به تاثیرپذیری فوق‌العاده شدید باد (به ویژه جهت باد) به موقعیت و خصوصیت خشکی و ایستگاه مورد اندازه‌گیری و تغییرات خرد مقیاس باد مربوط باشد [۲]. الگوی تغییرات جهت و سرعت باد در دو ایستگاه از سواحل جنوبی خزر تا حد زیادی به هم شباهت دارد و تنها در بعضی از فصول سال تفاوت‌های جزئی دیده می‌شود اما سرعت باد در نوشهر غالباً بالاتر از سرعت باد اندازه‌گیری شده توسط بویه کياشهر است. با توجه به الگوی باد در هر فصل، تطابق و همبستگی خوبی بین سرعت و جهت باد و جریان دیده می‌شود و الگوی جریان در هر دو ایستگاه غالباً شرقی است [۲] که با گردش کلی توده آب در این ناحیه (شکل ۴ و ۵ [۳۹]) همخوانی دارد. سرعت جریان در سواحل نوشهر بیشتر از کياشهر است و در نوشهر مقادیر سرعت بیش از ۶۰ cm/s فراوانی بیشتر دارد. مقایسه مقادیر ارتفاع موج حاصل از اندازه‌گیری بویه در کياشهر و نوشهر بیانگر آن است که بیشترین احتمال وقوع موج، در بویه کياشهر مربوط به امواج با ارتفاع صفر تا ۰/۵ متر و در بویه نوشهر مربوط به امواج با ارتفاع ۰/۲۵ تا ۱ متر است (شکل ۷).

همچنین پیش‌بینی ارتفاع و پریود امواج ناشی از باد جنوب شرقی خزر در دو بویه موج‌نگار نكاء (N ۳۷°۶، E ۵۸°۱۸، عمق ۴۸ m، تاریخ ۱۹۸۹/۱۱/۰۱ الی ۱۹۸۹/۱۱/۰۱ با بازه ثبت داده‌ای سه ساعته) و امیرآباد (N ۳۶°۵۵، E ۳۷°۲۴، عمق ۱۷ m، تاریخ ۲۰۰۲/۰۲/۱۹ الی ۲۰۰۲/۰۳/۱۹ با بازه ثبت داده‌ای دو ساعته)، با استفاده از روش درختان تصمیم رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است [۴۱]. برای آن منظور از الگوریتم CART استفاده شده است که این الگوریتم، یکی از معروف‌ترین روش‌های انجام درخت تصمیم‌گیری است [۴۲]. از بین داده‌های موجود، دو سوم برای ساخت و یک سوم برای ارزیابی مدل‌ها انتخاب شده است. نتایج این پژوهش، نشان می‌دهد که در ایستگاه بندر امیرآباد، دقت روش‌های درختی و عصبی حدود دو برابر روش‌های نیمه تجربی و طیفی بوده و با روش‌های عددی برابری می‌کند. در ایستگاه منطقه نكاء نیز دقت دو روش تقریباً یکسان به دست آمده است. در این

<sup>1</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



شکل (۷) مقایسه توزیع ارتفاع امواج اندازه گیری شده در خزر جنوبی (سواحل مازندران و گیلان) که از مرجع [۲] بازنویسی شده است.

جدول (۳) شاخص های خطا در شبیه سازی موج خزر [۴۴].

بویه	دامنه	مهارت مدل	CC یا R	BIAS	RMSE
فراساحلی	$H_s$ (m)	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۲۴	۰/۳۸
	$(sec)_{\cdot 2} T_m$	۰/۸۳	۰/۷۴	-۰/۲۸	۰/۷۲
انزلی	$H_s$ (m)	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۱۴	۰/۲۹
	$(sec)_{\cdot 2} T_m$	۰/۷۶	۰/۶۲	-۰/۲۷	۰/۷۹

جدول (۴) موج غالب خزر جنوبی [۴۵].

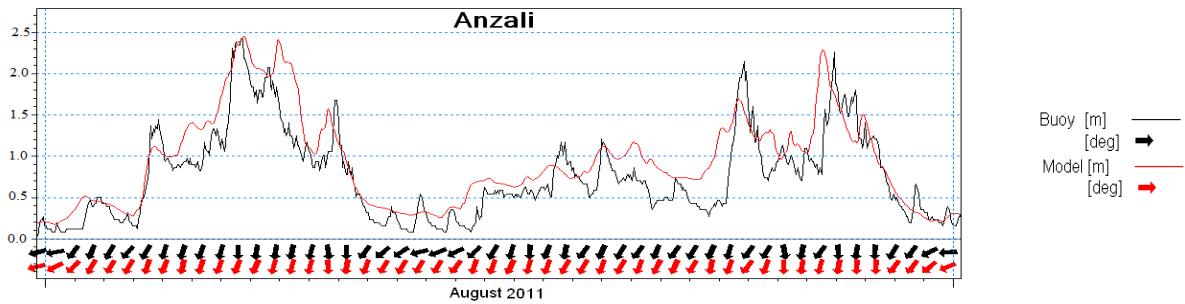
روش	جهت	ارتفاع موج (m)
SPM	غربی	۰/۱۸۵
مدل SW	غربی	۰/۴۸۵
بویه اندازه گیری	غربی	۰/۲۸۵

پس به خوبی از این دو تحقیق متفاوت دیده می شود که اگرچه در خزر شمالی، ارتباط منطقی بین باد و امواج دیده می شود (مرجع [۴۳] را ببینید) اما در خزر جنوبی این ارتباط دیده نمی شود (مرجع [۴۴] را ببینید). اگرچه طبق جدول ۳، مقادیر متوسط خطای پیش بینی موج در دوره تناوب موج ( $T_m$ ) اندکی بیشتر از میزان خطا برای مقادیر ارتفاع موج ( $H_s$ ) است. مقدار منفی شاخص BIAS نشان می دهد که مقادیر دوره تناوب امواج اندکی پایین تر پیش بینی شده اند.

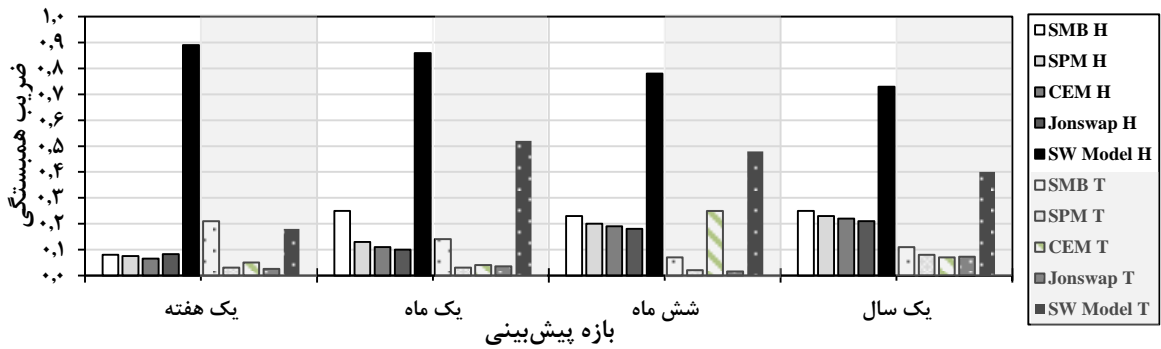
مشخصات موج با استفاده از روش های نیمه تجربی JONSWAP، CEM، SPM، SMB و مدل SW از بسته نرم افزاری MIKE21 در خزر جنوبی نیز مورد آزمایش قرار گرفته است. برای این منظور از داده های بویه بندر امیرآباد و بویه نکا جهت مقایسه استفاده گردیده است [۴۵]. با مقایسه ضریب همبستگی<sup>۱</sup> داده های بویه و روش های نیمه تجربی و مدل عددی ذکر شده، مشخص گردید که مدل SW بهترین روش برای پیش بینی امواج خزر جنوبی است (شکل ۹). اگرچه طبق اطلاعات داده های اندازه گیری گل موج (شکل ۱۰) مشخص شد که جهت غالب موج در منطقه غربی است (جدول ۴) و سایر روش های نیمه تجربی و مدل عددی به این نتیجه اذعان

داشتند، اما معلوم گردید که روش SPM، توانایی بیشتری در تعیین ارتفاع موج غالب منطقه خزر جنوبی دارد.

<sup>1</sup> Correlation Coefficient

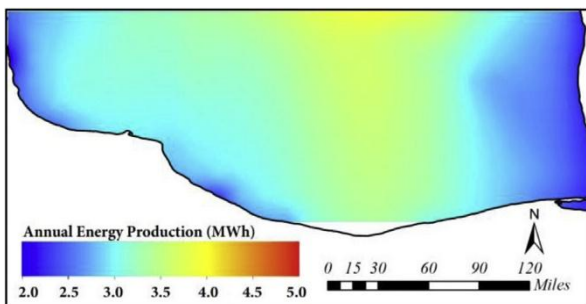


شکل (۸) نمونه‌ای از مقایسه ارتفاع امواج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در بویه انزلی واقع در خزر جنوبی [۴۴].



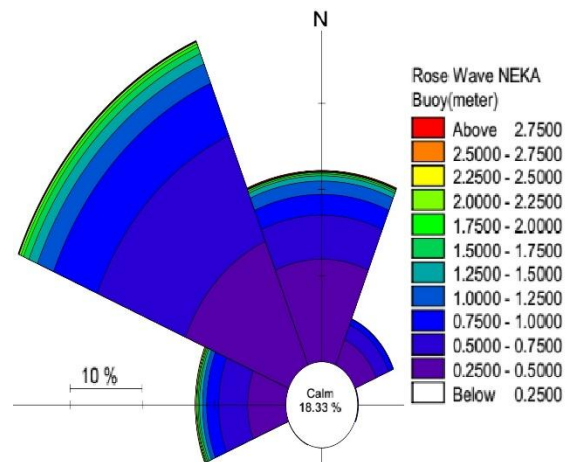
شکل (۹) ضریب همبستگی بویه اندازه‌گیری با ارتفاع (H) و دوره تناوب (T) موج حاصل از روش‌های گوناگون تولید موج در خزر. این شکل با بازنویسی اطلاعات از مرجع [۴۵] تهیه شده است.

تحلیل عدم قطعیت در پارامترهای دوره اوج موج، ارتفاع موج قابل توجه در هر دوره اوج موج، به همراه یک شبیه‌سازی هزار ساله مونت کارلو انجام شده است [۴۶]. نتایج نشان می‌دهد که تجزیه و تحلیل عدم قطعیت منجر به میانگین ۹ درصد کم‌تر از چگالی توان موج متوسط و ۷,۳ درصد انرژی کم‌تر از تحلیل متعارف می‌شود (شکل ۱۱ و ۱۲).



شکل (۱۱) تولید انرژی سالانه موج در دریای خزر جنوبی با روش معمولی [۴۶].

در پژوهشی دیگر [۴۷] شبیه‌سازی امواج خزر جنوبی، با استفاده از مدل تودرتوی SWAN و میدان باد ECMWF-ERA40 انجام شد. سپس شبیه‌سازی نتایج با



شکل (۱۰) گل موج سالیانه به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری بویه نکا [۴۵].

علاوه بر مطالعه موج با استفاده از روش‌های نیمه تجربی SMB، SPM، CEM، JONSWAP و مدل SW که در مرجع [۴۵] به آن پرداخته شده است، روش تحلیل عدم قطعیت در پتانسیل انرژی موج نیز با استفاده از داده‌های ۱۱ ساله ECMWF در ۲۱۰ نقطه خزر جنوبی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، یک مدل SWAN برای مدل‌سازی موج انجام شده است و انرژی موج با استفاده از تحلیل‌های متعارف محاسبه شده‌اند و سپس



خطاها		
شاخص	ISWM II	۵۱
پراکندگی	ECMWF	۳۱
		۵۱
		۴۲

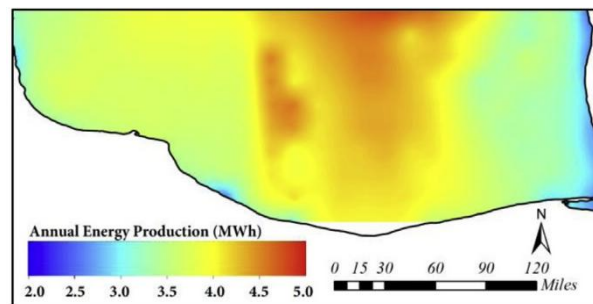
### بحث و نتیجه گیری

نتایج و بازبینی مطالعات مختلف در دریای خزر جنوبی نشان می‌دهد که بیشینه ارتفاع موج به میزان ۵/۵۸ متر در جهت غربی است [۴۰]، اما ارتفاع موج بیشینه متغیری تصادفی است که تعداد موج‌ها در تعیین توزیع آن بسیار تاثیرگذار هستند (بویه اندازه‌گیری واقع در سواحل گیلان و مازندران؛ ایستگاه‌های کیانشهر و نوشهر) [۲]. میانگین سالیانه گلموج غالب منطقه نیز، غربی و سپس شمالی است (جدول ۲، روش SBM، [۴۰]). شکست امواج خزر جنوبی نیز (سه ایستگاه رستمرو، نور و رویان) از نوع آشفته است [۴۰].

با توجه به الگوی باد در هر فصل، تطابق و همبستگی خوبی بین سرعت و جهت باد و جریان دیده می‌شود و الگوی جریان غالباً شرقی است (ایستگاه‌های نوشهر و کیانشهر) [۴۰] که با گردش کلی توده آب در خزر جنوبی همخوانی دارد (شکل ۴ و ۵ [۳۹]). اما شناخت الگوی دقیق باد در شبیه‌سازی امواج منطقه بسیار تاثیرگذار است. به طوری که تفاوت دو نوع باد (باد ECMWF-ERAI و باد مورد استفاده در مدل ISWM II) در تولید موج بیشینه با استفاده از شبیه‌سازی مدل تودرتوی SWAN و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری معلوم بود. ارتفاع موج بیشینه، ۰/۵ تا ۱/۵ متر بیشتر در داده باد دقیق‌تر (ECMWF-ERAI) و البته نزدیک‌تر به اندازه‌گیری به دست می‌آمد [۴۷]. اگرچه در موج‌هایی که دارای ارتفاع کمتر از ۱/۵ m می‌بودند، هر دو نوع باد، می‌توانست امواج را به خوبی شناسایی کند [۴۷]. به علاوه، ابعاد حوضه‌ای که توزیع باد جهت تولید امواج ناشی از باد دخالت دارند نیز در رژیم مناسب امواج دخیل است. میدان باد تولید شده از حوضه کوچک‌تر مدل WRF، می‌توانست نتایج دقیق‌تری در مدل SWAN، به ویژه در نزدیکی ساحل، فراهم کند [۴۵].

طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، نوع روش شبیه‌سازی امواج در خزر جنوبی بسیار تاثیرگذار در نتایج است. شبیه‌سازی هزار ساله مونت کارلو در خزر جنوبی [۴۶] نشان داد که تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، می‌تواند

مقادیر اندازه‌گیری ایستگاه‌های نکا، نوشهر و انزلی با ضریب همبستگی ۹۴ درصد مقایسه و صحت‌سنجی شد. به طور مجدد، مدل‌سازی با میدان باد مورد استفاده در ISWM II انجام گردید. اگرچه میدان باد مورد استفاده در ISWM II اصلاح شده بود، اما بالاتر بودن دقت مکانی میدان باد ECMWF-ERAI موجب بهبود دقت نتایج دوره تناوب موج تا ۱ s و ارتفاع موج بین ۰/۵-۱/۵ m، در بخش شرقی و مرکزی خزر شد (جدول ۴ را ببینید). اگرچه در غرب حوضه، نتایج مدل با باد ECMWF-Reanalysis INIO، منجر به مقادیر اندازه‌گیری دقیق‌تری شد. به علاوه در زمان‌هایی که ارتفاع موج اندازه‌گیری کمتر از ۱/۵ متر بود، نتایج مدل با میدان باد مورد استفاده در ISWM II هر دو به مقادیر اندازه‌گیری نزدیک‌تر بود. به عبارتی نقش الگوی میدان باد دقیق در سرتاسر حوضه در ایجاد امواج ناشی از باد در این پژوهش معلوم گردید.



شکل (۱۲) تولید انرژی سالانه موج در دریای خزر جنوبی با روش آنالیز عدم اطمینان [۴۶].

جدول (۵) محاسبه مقادیر آماری بین مشخصه موج حاصل از اندازه‌گیری و مدل‌سازی در ایستگاه نوشهر [۴۷].

پارامتر	ارتفاع موج (m)	دوره تناوب (s)
متوسط اندازه‌گیری	۰/۷۴	۳/۷
متوسط مقادیر مدل‌سازی	۰/۴۵	۱/۹۴
ISWM II	۰/۷۸	۲/۲۶
ECMWF	۰/۷۸	۲/۲۶
ضریب همبستگی	٪۹۶	٪۸۶
ISWM II	٪۹۴	٪۸۴
ECMWF	٪۹۴	٪۸۴
جزر متوسط مربع	۰/۳۸	۱/۹۱
ISWM II	۰/۳۸	۱/۹۱
ECMWF	۰/۲۳	۱/۵۸

Indian Journal of Geo-Marine Sciences, Vol.43(6), June 2014, Pp. 905-920, 2014

[5] Moradi M. and Kabiri K., "Spatial modeling and data management of the Persian Gulf wave atlas," in CHUSER 2012 - 2012 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research, 2012, Vol May 2014, pp. 177-182, 2012. doi: 10.1109/CHUSER.2012.6504306.

[۶] رجبی، سمانه، چگینی، وحید، لاری، کامران، کامران‌زاد، بهاره، حسینی، سیدطالب، "مدل‌سازی امواج ناشی از باد در منطقه انزلی SWAN با استفاده از مدل عددی"، اقیانوس‌شناسی، سال چهارم، شماره ۱۵، صفحات ۸۳ الی ۹۲، پاییز ۱۳۹۲.

[7] Toffoli A. and Bitner-gregersen, E. M., "Types of Ocean Surface Waves, Wave Classification", Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, pp. 1-8., 2017, doi: 10.1002/9781118476406.emoe077.

[8] Holthuijsen, L. H. "Waves in Oceanic and Coastal Waters", Cambridge university press, 2010.

[۹] الله‌دادی، م.، بدیعی، پ.، بررسی میزان اعتبار روابط تجربی پیش‌بینی امواج دریا در شرایط مختلف در مقایسه با یک مدل ریاضی، مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، صفحات ۶۷۱ الی ۶۸۰، ۱۳۷۹.

[۱۰] اسماعیلی، مهدی، و کهنه‌پوشی، آرام، "تعیین پارامترهای امواج دریایی در منطقه چابهار"، اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران، دوره ۱، صفحات ۱ الی ۸، ۱۳۹۱.

[11] Tuzhilkin V. S. and Kosarev A. N., "Thermohaline Structure and General Circulation of the Caspian Sea Waters," The Caspian Sea Environment, Vol. 5, No. October, pp. 33-57, 2005, doi: 10.1007/698\_5\_003.

[۱۲] منصوری، داریوش، و صدی، نسب، مسعود، اکبری‌نسب، محمد، "تغییرات فصلی میدان باد و گردش آب سطحی دریای خزر"، مجله علوم و فنون دریایی، دوره ۱۷، شماره ۱، صفحات ۶۸ الی ۸۲، ۱۳۹۷.

[13] Coastal Engineering Research Center (US). (1973). Shore protection manual (Vol. 1). US Army Coastal Engineering Research Center, US Gov. Print. Off. washington, DC, 1984.

[14] Bottin R. R. and Chatham C. E., "Design for Wave Protection, Flood Control, and Prevention of Shoaling", Cattaraugus Creek Harbor, New York: Hydraulic Model Investigation, Vol. 75, No. 18. Waterways Experiment Station, 1975.

[15] Stevens J. C., Hydraulic models, No. 25. Headquarters of the Society, 1942.

[16] Sverdrup H. U. and W. H. Munk, "Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting", No. 303. Hydrographic Office, 1947.

میانگین چگالی توان موج و انرژی موج را به ترتیب ۹٪ و ۷/۳٪ کمتر از تحلیل متعارف نشان دهد (شکل ۱۱ و ۱۲). همچنین مقایسه انواع روش‌های نیمه تجربی، SMB، SPM، CEM، JONSWAP، مدل MIKE21 (بسته SW) بیانگر آن است که بسته SW، بهترین روش برای پیش‌بینی امواج خزر جنوبی (ایستگاه بندر امیرآباد) است [۴۵]. دو روش درختان تصمیم رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز اگرچه جواب‌های نزدیک به هم دارند، اما دقت آن‌ها حدود دو برابر روش‌های نیمه تجربی، طیفی و روش‌های عددی است که این می‌تواند در نوع روش مورد استفاده در تحلیل امواج ناشی از باد خزر جنوبی تاثیرگذار باشد. اگرچه این دو روش (درختان تصمیم رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی) ارتفاع امواج ناشی از باد را کمی دست پایین و دوره تناوب موج را کمی دست بالا تخمین می‌زنند (ایستگاه بندر امیرآباد) [۴۱].

طبق نتایج حاصل از این پژوهش، داده‌های اندازه‌گیری مناسب در نواحی دور از سواحل ایران و آب‌های عمیق کمتر و مطالعات در این حوضه نیز به مراتب کمتر است. لذا می‌تواند برخی از عدم قطعیت نتایج درباره آب‌های دور از سواحل و آب‌های عمیق، وجود داشته باشد که البته تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند در تشخیص ناهنجاری‌های سطحی این مناطق، گره‌گشا باشند.

## منابع

[1] Kamranzad B., Etemad-Shahidi A., and Chegini V. "Sustainability of wave energy resources in southern Caspian Sea," Energy, vol. 97, pp. 549-559, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.11.063.

[۲] غلامی مازیار، و کرمی‌خانکی، علی، "مطالعه خصوصیات باد، جریان و موج در سواحل جنوبی دریای خزر به کمک داده‌های میدانی موجود"، سیزدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، صفحات ۱ الی ۱۲، ۱۳۹۰.

[۳] فتوحی، امین، خلیلی‌زاده، مجتبی، بهمن‌پوری، فرهاد، "شبیه‌سازی امواج دریای خزر با داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از مدل MIKE21 و مدل ایرانی PMODynamics و مقایسه نتایج با داده‌های مشاهداتی"، اولین همایش ملی توسعه پایدار دریا محور، صفحات ۱۱۲۴ الی ۱۱۳۰، ۱۳۹۳.

[4] Akpınar, A., Özger, M., Bekiroglu, S., & Komurcu, M. I. (2014). Performance evaluation of parametric models in the hindcasting of wave parameters along the south coast of Black Sea,

- [30] Moeini M. H. and Etemad-Shahidi A., "Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie", *Applied Ocean Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 137-145, 2007.
- [31] Cavaleri L. and Bertotti L., "The improvement of modelled wind and wave fields with increasing resolution," *Ocean Engineering*, Vol. 33, No. 5-6, pp. 553-565, 2006.
- [32] Bolaños-Sanchez R., Sanchez-Arcilla A., and Cateura J., "Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean," *Journal of Marine Systems*, Vol. 65, No. 1-4, pp. 336-353, 2007.
- [۳۳] بنازاده، محمدرضا، بیدختی، علی اکبر، خیراندیش، محمد، فدوی حسینی، هادی "بررسی اولیه مدل سه بعدی گردش در دریای خزر"، استقلال، دوره ۲۱، شماره ۱، صفحات ۲۰۷ الی ۱۳۸۱، ۲۲۰.
- [34] Kostianoy, A. G., Ginzburg, A. I., Lavrova, O. Y., Lebedev, S. A., Mityagina, M. I., Sheremet, N. A., & Soloviev, D. M. "Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions". In *Remote Sensing of the Asian Seas* (pp. 505-521). Springer International Publishing, Cham. 2019. doi:10.1007/978-3-319-94067-0
- [35] Rodionov S., "Global and regional climate interaction: the Caspian Sea experience", Vol. 11. Springer Science & Business Media, 2012.
- [36] Baydin S. S. and Kosarev A. N., "Kaspiyskoe more. Hidrologiya i gidrokimiya [The Caspian Sea. Hydrology and hydrochemistry]." Moscow: Nauka.(in Russ.), 1986.
- [37] Gunduz M. and Özsoy E., "Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea", *Ocean Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 459-471, 2014, doi: 10.5194/os-10-459-2014.
- [38] Tuzhilkin V. S., Kosarve A. N., Trukhchev D. I., and Ivanova, D. P., "Sezonnye osobennosti obchey cirkulyacii vod glubokovodnoy chaste Kaspiiskogo morey," *Meteorologiya i gidrologiya*, Vol. 1, pp. 91-99, 1997.
- [39] Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., and Sur H. I., "Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction," *Ocean Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 311-329, 2010, doi: 10.5194/os-6-311-2010.
- [۴۰] منصوری، داریوش، "بررسی امواج دریا در منطقه دریایی نور"، نهمین همایش صنایع دریایی، صفحات ۱ الی ۱۲، ۱۳۸۶.
- [۴۱] محجوبی، جواد، اردلان صمغی، حسین "پیش بینی پارامترهای امواج ناشی از باد با استفاده از مدل درختی و بررسی امکان تعمیم مدل، نشریه مهندسی دریا، جلد ۵، شماره ۹، صفحات ۶۵ الی ۷۱، ۱۳۸۸.
- [17] Goda Y., "Random seas and design of maritime structures". World scientific, 2010.
- [18] Kazeminezhad M. H., Etemad-Shahidi A., and Mousavi S. J., "Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters", *Ocean Engineering*. Vol. 32, No. 14-15, pp. 1709-1725, 2005.
- [19] Donelan M. A., "Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions". National Water Research Institute, 1980.
- [20] Schwab D. J., Bennett J. R., Liu P. C., and Donelan M. A., "Application of a simple numerical wave prediction model to Lake Erie", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. C3, pp. 3586-3592, 1984.
- [21] Bishop C. T., "Comparison of manual wave prediction models," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 109, No. 1, pp. 1-17, 1983.
- [22] Patraa S. K., Mohanty P. K., Mishra P., and Pradhanc U. K., "Estimation and validation of offshore wave characteristics of Bay of Bengal cyclones (2008-2009)," *Aquat. Procedia*, Vol. 4, pp. 1522-1528, 2015.
- [23] Oh S.H., Suh K.D., Son S. Y., and Lee D. Y., "Performance comparison of spectral wave models based on different governing equations including wave breaking," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 75-84, 2009.
- [24] Tolman H. L., "A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents", *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 21, No. 6, pp. 782-797, 1991.
- [25] Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., and Janssen P., "Dynamics and modelling of ocean waves". Cambridge University Press, 1996.
- [26] Sannasiraj S. A. and Goldstein M. G., "Optimal interpolation of buoy data into a deterministic wind-wave model," *Natural Hazards*, Vol. 49, No. 2, pp. 261-274, 2009.
- [27] Booij N., Ris R. C., and Holthuijsen L. H., "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 104, No. C4, pp. 7649-7666, 1999.
- [28] Ris R. C., "Spectral modelling of wind waves in coastal areas," *Oceanographic Literature Review*, Vol. 11, No. 44, p. 1234, 1997.
- [29] Moeini M. H., Etemad-Shahidi A., and Chegini V., "Wave modeling and extreme value analysis off the northern coast of the Persian Gulf," *Applied Ocean Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 209-218, 2010.

[42] Breiman L., Friedman J. H., Stone C. J., and Olshen R. A., "Classification and regression trees (Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1984)," Monterey, CA. CRC press, 1984.

[43] Rusu E. and Onea F., "Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea", Energy, Vol. 50, No. 1, pp. 1-14, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2012.11.044.

[۴۴] معینی، هادی، حمزه‌لو، سیما، جندقی‌علایی، مجید، "شبیه‌سازی میدان باد سطحی در دریای خزر برای استفاده در مدل‌های هیدرودینامیکی"، یازدهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، صفحات ۱ الی ۵، ۱۳۹۳.

[۴۵] قربانی‌طالقانی مهدی، گلشنی، علی اصغر، بررسی اقلیم موج در بندر امیرآباد با اجرای مدل محلی Mike21-SW و روش‌های نیمه‌تجربی، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰، صفحات ۱۹۳ الی ۲۱۰، ۱۳۹۰.

[46] Amirinia G., Kamranzad B., and Mafi S., "Wind and wave energy potential in southern Caspian Sea using uncertainty analysis," Energy, Vol. 120, pp. 332-345, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.088.

[۴۷] کمیجانی، فرشته، صدری‌نسب، مسعود، سیادت‌موسوی، سیدمصطفی، "شبیه‌سازی امواج در جنوب دریای خزر با به‌کارگیری میدان باد ECMWF (ERA-Interim) و مقایسه با نتایج ISWM II"، اقیانوس‌شناسی، سال ششم، شماره ۲۳، صفحات ۷۷ الی ۸۵، ۱۳۹۴.