

## شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با مدل عددی سوان

حسین فرجامی<sup>۱</sup>، سیدطالب حسینی<sup>۲\*</sup>، وحید چگینی<sup>۳</sup>، سیده سعیده محمدی<sup>۴</sup>

- ۱- کارشناسی ارشد فیزیک دریا، پژوهشکده هواشناسی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: hfarjami@gmail.com  
۲- کارشناس پژوهشی مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ایستگاه پژوهشی خلیج فارس، استان بوشهر، بوشهر، پست الکترونیکی: sthosseini@gmail.com  
۳- استادیار، مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: v\_chegini@inio.ac.ir  
۴- کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: saeede\_10@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۸

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۸

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۰، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

### چکیده

پیش‌بینی و تخمین امواج در فعالیت‌های مختلف نواحی ساحلی مانند صنعت شیلات، بندر و دریانوردی، مدیریت بندر، حمل و نقل دریایی، سازه‌های دریایی و فعالیت‌های نفتی، نسبت انتقال رسوب و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین در مناطق ساحلی، امواج و جریان‌ها نقش مهمی در تعیین هندسه و شکل سواحل ایفا می‌کنند. از آنجا که مدل سوان (SWAN (Simulating WAVes Nearshore) برای آب‌های کم عمق مناطق ساحلی طراحی شده است؛ در این تحقیق، با استفاده از این مدل به مطالعه امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر و اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی، از اطلاعات باد مدل هواشناسی (GFS) و آمار باد بویه هواشناسی بوشهر در سال ۲۰۰۸ استفاده و پس از شبیه‌سازی امواج، از داده‌های ثبت شده بویه برای اعتبارسنجی مشخصه‌های موج از جمله ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و دوره‌ی تناوب موج ( $T_s$ ) استفاده شده است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص پراکندگی برای ارتفاع موج و دوره‌ی تناوب موج شاخص به ترتیب ۲۳/۴۴ و ۱۸/۴۵ درصد است. بنابراین از این مدل می‌توان با دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد و همچنین تهیه اطلس هیدرودینامیکی خلیج بوشهر استفاده نمود.

کلمات کلیدی: امواج ناشی از باد، مدل SWAN خلیج بوشهر، پیش‌بینی موج، شبیه‌سازی موج، خلیج فارس

### ۱. مقدمه

اکتشاف، حفاری و استخراج نفت و یا پایانه‌های حمل و نقل نفت خام همواره در معرض امواج ناشی از باد قرار دارند. مقدار نیروهای دینامیکی وارد شده به سازه‌های دریایی نظیر سکوها، موج‌شکن‌ها و اسکله‌ها در اثر برخورد امواج، عاملی بسیار مهم در تعیین پایداری و طرح اجزای مختلف برای مهندسی در طراحی

موج یکی از پدیده‌های مهم و تعیین‌کننده در مناطق ساحلی و نیز مهم‌ترین پارامتر در کلیه مسایل و مطالعات مهندسی سواحل و مهندسی فراساحلی است. سازه‌های دریایی از قبیل سکوها

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری مستقیم در محل (از جمله موج‌نگار) و برداشت‌های ماهواره‌ای موجود در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه انجام شده است. در این مطالعات علاوه بر شبیه‌سازی پارامترهای موج در طول ۱۲ سال مذکور، به کمک یک تابع توزیع احتمالاتی، ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج شاخص نیز برای دوره بازگشت‌های متفاوت ۱، ۵، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای کلیه نقاط شبکه، استخراج گردیده است.

مقیمی (۱۳۸۳)، با به‌کارگیری مدل‌های کی<sup>۱</sup> و سوان به بررسی اثر متقابل پدیده‌های ساحلی در مناطق کم‌عمق کشندی پرداخته است.

بنگ چان لی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، به پیش‌بینی امواج ناشی از باد در آب‌های تایوان<sup>۳</sup> با مدل سوان پرداخته‌اند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داده که برآورد دوره تناوب موج، همواره کوچکتر از مقدار واقعی است. به‌علاوه آن‌ها در این تحقیق به بررسی اتلاف موج<sup>۴</sup> و اقتباس یک فرمول اتلاف موج جدید پرداخته‌اند.

سانتوز<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، با به‌کارگیری مدل سوان به پیش‌بینی امواج ناشی از باد در خور تاگس<sup>۶</sup> پرداخته‌اند. آن‌ها با تهیه رژیم باد نزدیک به ساحل خور تاگس، مشخصه‌های موج این خور را تحت متعارف‌ترین شرایط آب و هوایی آن پیش‌بینی نموده و نتایج حاصل از مدل سوان را با دیده‌بانی‌های موج انجام شده در ساحل خور مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده‌اند.

استراس<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، در منطقه ساحل طلایی استرالیا<sup>۸</sup> نتایج دو مدل موج فروساحلی مایک<sup>۹</sup> و سوان را با هم مقایسه کرده‌اند. فراسنجی<sup>۱۰</sup> شرایط مرزی با توجه به داده‌های مدل موج جهانی NOAA (Wave Watch III)<sup>۱۱</sup> انجام شده و سرانجام خروجی‌های دو مدل با داده‌های ثبت شده بویه در منطقه مورد مطالعه مقایسه شده‌اند.

معینی و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی امواج ناشی از باد در دریاچه‌ی اریه<sup>۱۲</sup> با استفاده از مدل‌های Mike21 و سوان و نیز

سازه‌های دریایی محسوب می‌شود. همچنین در صنعت شیلات، بنادر و دریانوردی، مدیریت بنادر، حمل و نقل دریایی، فعالیت‌های نفتی و آلودگی‌های دریایی و در تبادل هوا - آب و سایر پدیده‌های فصل مشترک هوا - دریا، از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین در مطالعات انتقال رسوب نیز ارتفاع موج پارامتری است که به‌طور مستقیم در محاسبه نرخ انتقال رسوبات موثر بوده و میزان این انتقال حساسیت شدیدی نسبت به این پارامتر دارد. بنابراین عدم آگاهی از مشخصات امواج در زمان و مکان معین، می‌تواند خسارات جانی و مالی فراوانی را به بار آورد. به این ترتیب جهت کاربرد در موارد مختلف، در اختیار داشتن آمار مختلف از مشخصات امواج و پیش‌بینی آنها جزو اساسی‌ترین شرایط لازم است (برگی، ۱۳۷۹؛ حاج‌بابایی، ۱۳۸۱).

امواج ناشی از باد عمده‌ترین امواج مشاهده شده در دریا هستند و بیشترین اثر را بر فعالیت‌های بشری در محیط دریا دارند. از این‌رو، طی چند دهه گذشته روش‌ها و مدل‌های مختلفی اعم از روابط تجربی و مدل‌های ریاضی توسعه یافته‌اند که میان سرعت باد و پارامترهای موج از قبیل ارتفاع آن به‌صورت مستقیم یا غیر مستقیم رابطه‌ای برقرار می‌کنند (گلشاهی، ۱۳۸۵).

رفتار امواج تا حد زیادی به رابطه بین اندازه موج و عمق آبی که در آن حرکت می‌کنند بستگی دارد. سرعت امواج معمولاً وابسته به طول موج آنها است و بیشترین تندی مربوط به امواجی با طول موج بلند است (گلشاهی، ۱۳۸۵). فرایند رشد موج علاوه بر سمت و تندی باد، به مدت وزش باد و فاصله‌ای که نقطه مورد نظر دور از ساحل واقع شده (طول موجگاه)، بستگی دارد.

شهرهای ساحلی از جمله بندر بوشهر به‌دلیل صنعت شیلات، دریانوردی، مدیریت بنادر، حمل و نقل دریایی، فعالیت‌های نفتی نیاز روز افزون به پیش‌بینی امواج دارند. چنین مطالعه‌ای می‌تواند پایه‌ای برای سایر مطالعات وابسته‌ی هیدرولیک و هیدرودینامیک این منطقه باشد. در پایین به برخی از مطالعات انجام یافته در زمینه‌ی مدل‌سازی امواج اشاره شده است.

مؤسسه ملی اقیانوس شناسی با حمایت مالی سازمان بنادر و دریانوردی، در مطالعات مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران به مدل‌سازی دوازده ساله امواج دریا‌های خزر، عمان و خلیج فارس از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۳ میلادی پرداخته است. در این مطالعات، با استفاده از آمار باد شبیه‌سازی شده توسط مدل هواشناسی جهانی مرکز (ECMWF)، مدل‌سازی موج توسط نرم‌افزار Mike21SW انجام شده و واسنجی (کالیبراسیون) مدل Mike21

<sup>1</sup> K Model

<sup>2</sup> Beng-Chun Lee

<sup>3</sup> Taiwan Water

<sup>4</sup> Wave dissipation

<sup>5</sup> João Alfredo Santos

<sup>6</sup> Tagus

<sup>7</sup> D. Strauss

<sup>8</sup> Gold Coast, Australia

<sup>9</sup> Mike 21

<sup>10</sup> parameterized

<sup>11</sup> NOAA Wave Watch III global wave model

<sup>12</sup> Lake Erie

چهارم معرف یک تغییر در فرکانس نسبی ناشی از تغییرات عمق و جریان‌ها هستند (با سرعت انتشار  $C_\theta$  در جهت  $\sigma$ ). جمله پنجم انکسار ناشی از عمق و جریانات و انتشار آنها با زاویه  $\theta$  است (با سرعت انتشار  $C_\theta$  در جهت  $\theta$ ). جمله  $S = S(\sigma, \theta)$  در سمت راست معادله، چشمه‌ی چگالی انرژی است.

در این مدل از روش عددی تفاضل متناهی با طرح‌واره پنج بعدی: زمان  $(t)$ ، مکان  $(x, y)$ ، جهت‌های طیفی  $(\sigma, \theta)$  برای حل عددی معادلات استفاده شده است. اگرچه این مدل را می‌توان برای هر مقیاسی به کار برد، اما برای مناطق ساحلی طراحی شده است. از این رو می‌تواند با دیگر مدل‌های نسل سوم از جمله WAVEWATCH III یا WAM جفت شود (WAMDI, 1988).

از آنجا که تاکنون با استفاده از مدل سوان به بررسی امواج در بندر بوشهر پرداخته نشده است، لذا در این تحقیق، با به کارگیری این مدل، امواج ناشی از باد در موقعیت جغرافیایی خلیج بوشهر شبیه‌سازی شده و سپس با مشخصه‌های امواج ثبت شده بویه‌ی هواشناسی مقایسه و ارزیابی شده است.

## ۲-۲. منطقه مورد مطالعه

خلیج بوشهر، خلیج کوچکی در امتداد سواحل شمالی خلیج فارس و در شمال شبه جزیره بوشهر است که با توجه به نقشه هیدروگرافی مورد استفاده در این مطالعه، در منطقه‌ای به وسعت تقریبی  $25 \times 16$  کیلومتر مربع، از طول جغرافیایی  $50^\circ$  درجه و  $42^\circ$  دقیقه شرقی تا  $50^\circ$  درجه و  $52^\circ$  دقیقه شرقی و از عرض جغرافیایی  $28^\circ$  درجه و  $52^\circ$  دقیقه شمالی تا  $29^\circ$  درجه و  $5^\circ$  دقیقه و  $27^\circ$  ثانیه شمالی کشیده شده است (شکل ۱).

نقشه‌ی هیدروگرافی با مقیاس  $1:25000$  خلیج بوشهر، توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح در سال  $1375$  تهیه و در سال  $1389$  ( $2010$ ) توسط اداره هیدروگرافی بریتانیا مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفته است. این نقشه با استفاده از نرم‌افزارهای Surfer و Excel، در یک شبکه شامل  $100$  ردیف در راستای عرض جغرافیایی و  $65$  ستون در راستای طول جغرافیایی با فاصله‌ی شبکه‌ای  $250$  متر راقومی و در مدل به کار گرفته شد (شکل ۲). همچنین در مرز جنوب‌غربی خلیج بوشهر بویه‌ی هواشناسی در عمق  $20$  متر قرار گرفته که پیش‌تر به آن اشاره شد. شکل ۲، خطوط تراز عمق خلیج بوشهر، و موقعیت بویه هواشناسی بوشهر را نشان می‌دهد.

داده‌های دو بویه پرداخته‌اند و با به کارگیری روش‌های آماری درصد خطای مدل‌های مذکور در موقعیت بویه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱-۲. توصیف مدل موج سوان

مدل سوان، مدلی نسل سوم است که قابلیت اجرا در وضعیت‌های نسل اول، دوم و سوم را نیز دارا است. این مدل برای مناطق ساحلی توسعه یافته است و می‌تواند امواج را به شکل دلخواه در دو وضعیت ایستا و نایستا<sup>۱</sup> و در مختصات دکارتی، منحنی‌الخط و یا کروی مورد بررسی قرار دهد. وضعیت ایستا برای امواجی به کار می‌رود که در مدت نسبتاً کوتاه‌تری به شرایط کاملاً نمو یافته برسند و در این وضعیت پایدار باقی بمانند (Booij et al., 2009).

امروزه مدل سوان به شکل گسترده‌ای در تخمین امواج ناشی از باد مناطق ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طیفی که در این مدل در نظر گرفته شده، علاوه بر اثرات چگالی طیفی جنبشی  $N(\sigma, \theta)$ ، شامل چگالی طیفی انرژی  $E(\sigma, \theta)$  (رابطه ۱) نیز می‌شود.

$$N(\sigma, \theta) = (E(\sigma, \theta)) / \sigma \quad (1)$$

متغیرهای مستقل در رابطه فوق عبارتند از؛  $\sigma$  فرکانس و  $\theta$  جهت حرکت موج (جهت نرمال حرکت فراز موج برای هر جزء طیفی است). در مدل موج سوان طیف موج در موقعیت  $(x, y)$  و زمان  $(t)$  با معادله تعادل طیفی در مختصات دکارتی به شکل رابطه (۲) است (Booij et al., 2009).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

جمله‌ی اول در سمت چپ این معادله نرخ موضعی تغییرات چگالی در زمان، جملات دوم و سوم انتشار در فضای جغرافیایی (سرعت‌های انتشار  $C_x$  و  $C_y$  در جهت‌های  $x$  و  $y$  است) و جمله

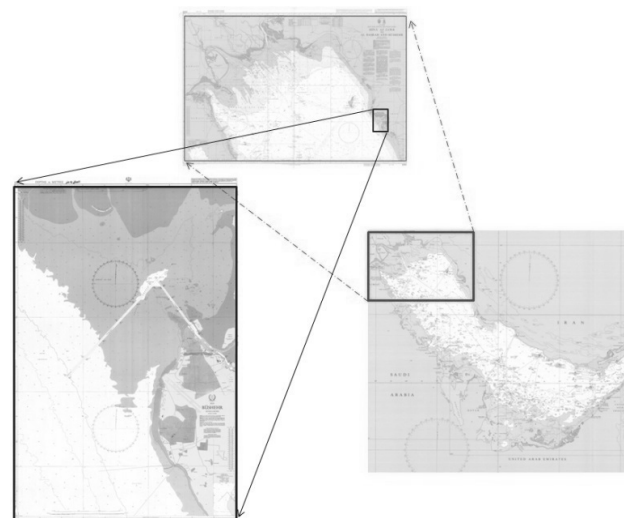
<sup>1</sup> Stationary, Nonstationary.

گرفته است. از آنجا که این مدل نیازمند مقادیر فضایی و مکانی باد می‌باشد؛ ابتدا برای تنظیم داده‌های ورودی مدل سوان درشت<sup>۲</sup> (مدل سوان در خلیج فارس)، از عمق‌سنجی خلیج فارس با فاصله‌ی شبکه‌ای ۲ دقیقه عرض جغرافیایی در راستای شمالی - جنوبی و ۲ دقیقه طول جغرافیایی در راستای شرقی - غربی مربوط به داده‌های ارتفاع‌سنجی ETOPO2 سایت NOAA استفاده شد. همچنین داده‌های میدان باد GFS<sup>۳</sup> با فاصله‌ی شبکه‌ای ۰/۵ درجه (۰/۵ درجه عرض جغرافیایی در راستای شمالی - جنوبی و ۰/۵ درجه طول جغرافیایی در راستای شرقی - غربی) روی سطح خلیج فارس از سایت NCEP به شکل فایل‌های GRIB استخراج شد. سپس با به‌کارگیری نرم‌افزار GrADS<sup>۴</sup> این فایل‌ها به فایل‌های txt تبدیل شده تا برای مدل سوان قابل خواندن باشند. با اجرای سوان درشت و انجام عمل آشیان‌سازی (Nested کردن) روی خلیج بوشهر، مشخصه‌های موج در خلیج فارس و نیز شرایط مرزی خلیج بوشهر، به‌عنوان جزئی از خلیج فارس، به‌دست آمد.

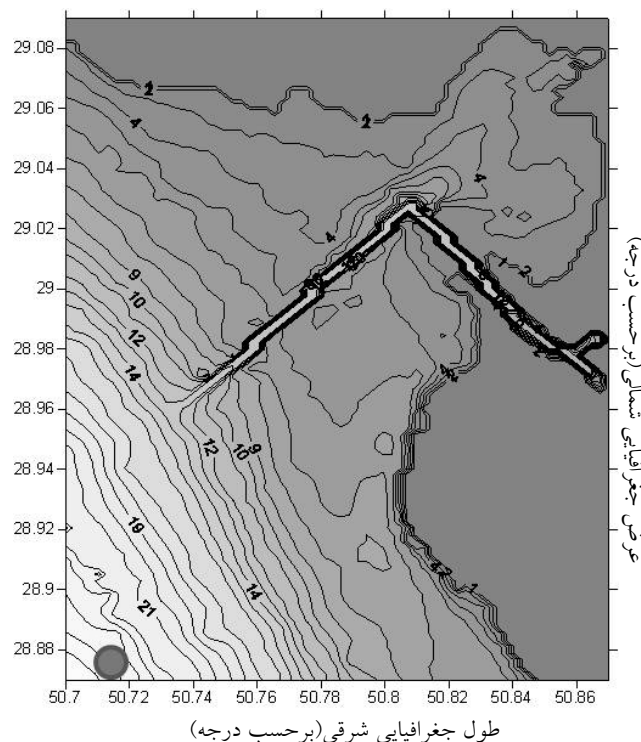
در اجرای مدل سوان ریز<sup>۵</sup> (مدل سوان در خلیج بوشهر) از عمق‌سنجی ۶۵×۱۰۰ سلولی خلیج بوشهر با فاصله‌ی شبکه‌ای ۲۵۰ متر (مساحت ۱۶۲۵۰×۲۵۰۰۰ متر مربع)، و داده‌های ساعتی باد بویه هواشناسی بوشهر و نیز شرایط مرزی برگرفته از مدل سوان درشت، به‌عنوان ورودی‌های مدل استفاده شد تا امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر شبیه‌سازی شود. بویه، باد در ارتفاع ۴ متری را اندازه‌گیری می‌کند که برای ورودی مدل، باید به باد در ارتفاع ۱۰ متری تبدیل شود. با استفاده از رابطه ۳ این تبدیل انجام شد (Army, 1984; Hasselmann et al., 1973):

$$U_{10} = U_z \left( \frac{10}{z} \right)^{1/7} \quad (3)$$

در مدل رشدهای خطی (Cavaleri et al., 1981) و نمایی (Komen et al., 1984) ناشی از ورودی باد، هردو، مورد استفاده قرار گرفتند. اندرکنش چهارگانه موج<sup>۶</sup>، اتلاف ناشی از



شکل ۱- موقعیت خلیج بوشهر در خلیج فارس



شکل ۲- عمق‌سنجی<sup>۱</sup> خلیج بوشهر و موقعیت بویه (●).

### ۳-۳. اجرای مدل

در این مطالعه برای شبیه‌سازی امواج ناشی از باد، مدل سوان کد ۴۰/۷۲ در دستگاه مختصات دکارتی مورد استفاده قرار

<sup>۱</sup> Bathymetry

<sup>۲</sup> Coarse SWAN

<sup>۳</sup> Global Forecasting System

<sup>۴</sup> Grid Analysis and Display System

<sup>۵</sup> Fine SWAN

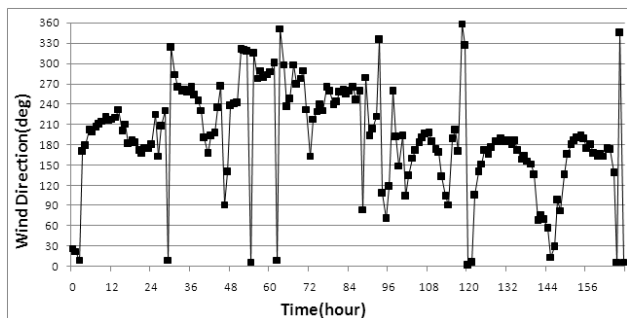
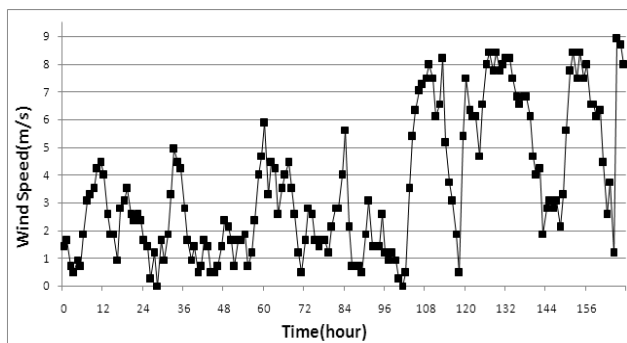
<sup>۶</sup> Linear and exponential growths of wind input

<sup>۷</sup> Quadruplet wave interaction

به مدت زمان شبیه‌سازی برای عبور مدل از مرحله گرم شدن، اضافه می‌گردد.

در تحقیق حاضر، کل زمان شبیه‌سازی از ساعت ۰۱:۰۰ AM روز ۱ سپتامبر سال ۲۰۰۸ تا ساعت ۰۱:۰۰ AM روز ۱۷ سپتامبر سال ۲۰۰۸، به مدت ۳۸۵ ساعت، انتخاب شده است که دو بازه ۴۸ ساعت، یکی قبل از واسنجی (از ۰۱:۰۰ در تاریخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۹ تا ساعت ۰۰:۰۰ در تاریخ ۲۰۰۸/۰۳/۰۹) و دیگری قبل از راست‌آزمایی (از ۰۱:۰۰ در تاریخ ۲۰۰۸/۰۸/۰۹ تا ساعت ۰۰:۰۰ در تاریخ ۲۰۰۸/۱۰/۰۹) به مرحله گرم شدن مدل اختصاص یافت.

در این مطالعه، برای واسنجی و راست‌آزمایی مدل از داده‌های ساعتی باد و موج بویه هواشناسی بوشهر (نشان داده شده در شکل ۲) استفاده شده است. طول دوره واسنجی ۱۵۸ ساعت (۷ شبانه‌روز)، از ۰۱:۰۰ روز ۳ سپتامبر سال ۲۰۰۸ تا ساعت ۰۰:۰۰ روز ۱۰ سپتامبر سال ۲۰۰۸ انتخاب شد. تغییرات سرعت و جهت باد بویه موج‌نگار در مدت واسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین مشخصه‌های کلی این باد در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که در طول دوره واسنجی باد غالباً جنوب شرقی تا جنوب غربی است ( $270 < \text{جهت غالب باد} < 150$ ).



شکل ۳- تغییرات سرعت و جهت داده‌های باد بویه‌ی هواشناسی موج‌نگار در مدت واسنجی

سفیدک رأس موج<sup>۱</sup>، اصطکاک بستر<sup>۲</sup> و شکست موج ناشی از عمق<sup>۳</sup> در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند. در سوان درشت و سوان ریز گام‌های زمانی به ترتیب ۲۰ دقیقه و ۲ دقیقه، وضوح‌های جهتی طیفی<sup>۴</sup> به ترتیب ۳۰ درجه و ۲۰ درجه و نیز تعداد شبکه در فضای فرکانسی<sup>۵</sup> بین کمینه فرکانس  $0.0418\text{Hz}$  و بیشینه فرکانس  $1\text{Hz}$  به ترتیب ۲۰ و ۳۰ انتخاب شدند.

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. واسنجی

در مدل سوان، به سه شکل می‌توان داده باد را اعمال کرد:

۱- باد ثابت برای همه زمان‌ها و در همه مکان‌های محدوده مورد مطالعه.

۲- باد متغیر با زمان و ثابت در همه قلمرو مطالعاتی.

۳- باد متغیر با زمان و مکان.

در این مطالعه، میدان باد مدل هواشناسی GFS در سوان درشت مانند مورد ۳ (متغیر با زمان و مکان) و در سوان ریز داده‌های بویه هواشناسی بوشهر مطابق مورد ۲ (متغیر با زمان و ثابت در مکان)، وارد گردید.

معمولاً برای ارزیابی مدل‌های عددی، مدل ساخته شده با توجه به اطلاعات موجود برای یک حالت خاص تهیه و اجرا شده و پس از تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف آن و نزدیک شدن نتایج به واقعیت (مرحله واسنجی<sup>۶</sup>)، مدل برای شرایط دیگری اجرا و نتایج حاصل با اطلاعات میدانی موجود در این حالت مقایسه و دقت یا عدم دقت مدل تعیین می‌شود (مرحله راست‌آزمایی<sup>۷</sup>) (توفیقی و همکاران، ۱۳۸۵).

با توجه به این مسأله، چندین گام زمانی طول می‌کشد تا مدل، پس از اعمال شرایط مرزی، اثرات این شرایط خاص را در محدوده شبیه‌سازی شده، منعکس نماید و به همگرایی مطلوب برسد. این تعداد گام زمانی، تحت عنوان مرحله گرم شدن مدل<sup>۸</sup> مطرح است (توفیقی و همکاران، ۱۳۸۵). بنابراین زمان کوتاهی

<sup>1</sup> Dissipation due to whitecapping  
<sup>2</sup> Bottom friction  
<sup>3</sup> Depth induced wave breaking  
<sup>4</sup> Spectral directional resolution  
<sup>5</sup> Number of meshes in frequency-space  
<sup>6</sup> Calibration  
<sup>7</sup> Verification  
<sup>8</sup> Warm up

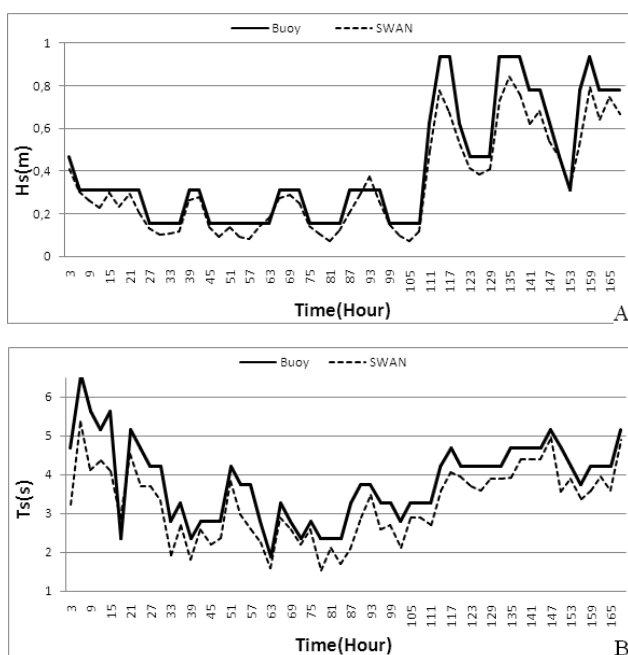
جدول ۱- مشخصه‌های آماری داده‌های باد بویه‌ی هواشناسی در مدت واسنجی

Station	Wind Speed(m/s)				Wind Direction(Deg.)			
	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation
Buoy Measured	0	8.9	3.56	2.52	1.4	358.6	190.6	78.4

این مقایسه که بیانگر خطای شبیه‌سازی است؛ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج بررسی آماری پیش‌بینی مدل سوان در مدت واسنجی

Hs(m)				Ts(sec)			
Ave. Buoy	Ave. Model	Bias	SI	Ave. Buoy	Ave. Model	Bias	SI
0.40	0.34	-0.07	23.00	3.82	3.24	-0.57	17.98



شکل ۴- مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری شده (A) و دوره تناوب موج (B) توسط بویه و شبیه‌سازی شده با مدل سوان در مدت واسنجی

### ۳-۲. راست‌آزمایی

مرحله راستی‌آزمایی از ساعت ۰۱:۰۰ روز ۱۰ سپتامبر سال ۲۰۰۸ تا ساعت ۰۱:۰۰ روز ۱۷ سپتامبر سال ۲۰۰۸ به مدت ۱۵۹ ساعت تعیین شد. تغییرات سرعت و جهت باد بویه موج‌نگار در مدت راستی‌آزمایی در شکل ۵ و مشخصه‌های آماری آن در جدول ۳

پارامتر قابل تنظیم برای واسنجی، آهنگ تغییر اتلاف سفیدک رأس موج<sup>۱</sup> انتخاب شد، چراکه با توجه به قرارگیری بویه هواشناسی بوشهر در آب عمیق، پارامترهای فیزیکی دیگر مانند شکست موج ناشی از عمق و اصطکاک بستر اثر قابل توجهی بر مشخصه‌های موج ندارند. همچنین برای مقایسه و ارزیابی کمی خروجی‌های مدل سوان با داده‌های بویه، پارامتر بیزی<sup>۲</sup> و شاخص پراکندگی<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار گرفتند (kazeminezhad et al., 2005; Moeni, 2007).

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (S_i - O_i) \quad (3)$$

$$\text{SI} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \times 100 \quad (4)$$

در این روابط N روابط کل داده‌ها،  $O_i$  داده‌های ثبت شده بویه و  $S_i$  مقادیر پیش‌بینی شده مدل است. در حالت آرمانی، اگر مقادیر  $O_i$  و  $S_i$  کاملاً بر هم منطبق باشند؛ شاخص پراکندگی (SI) و پارامتر بیزی (Bias) برابر صفر خواهند بود. بنابراین هرچه مقادیر این دو پارامتر به صفر نزدیک‌تر باشد؛ دقت مدل بالاتر است. در حالت کلی محدوده تغییر پارامتر بیزی از -۱ تا +۱ و شاخص پراکندگی از صفر تا ۱۰۰ است. بنابراین در واسنجی مدل، آهنگ تغییر اتلاف سفیدک رأس موج طوری تنظیم و انتخاب شد تا خطا (شاخص پراکندگی) در ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) شبیه‌سازی شده، به کوچکترین مقدار ممکن برسد. بر اساس نتایج واسنجی، پارامتر مذکور برابر  $1/38 \times 10^2$  تعیین شد. شکل ۴، مقایسه کیفی سری‌های زمانی ساعتی ارتفاع موج عمده ( $H_s$ ) و دوره تناوب موج عمده ( $T_s$ ) حاصل از مدل و داده‌های بویه را در طول دوره واسنجی نشان می‌دهد. همچنین خلاصه تحلیل آماری

<sup>1</sup> rate of whitecapping dissipation

<sup>2</sup> Bias

<sup>3</sup> scatter index

مطالعه، از داده‌های بویه هواشناسی در عمق ۲۰ متری استفاده شد که با وجود تطابق خوب روند تغییر ارتفاع موج و دوره تناوب پیش‌بینی شده مدل با داده‌های بویه، مقادیر این کمیت‌ها اندکی کمتر از مقادیر ثبت شده بویه است.

این اختلاف می‌تواند ناشی از خطای موجود در داده‌های ورودی مدل باشد (خطاهای موجود در داده‌های باد GFS، داده‌های باد بویه و تبدیل این باد به باد در ارتفاع ۱۰ متر، عمق سنجیها، خصوصاً عمق‌سنجی خلیج بوشهر که در آن ناگزیر به درون‌یابی عمق بعضی سلول‌ها بوده‌ایم).

بررسی آماری نتایج مدل سوان و داده‌های بویه نشان می‌دهد که در مدت راستی‌آزمایی، شاخص پراکندگی برای ارتفاع موج و دوره تناوب موج شاخص به ترتیب ۲۳/۴۴ و ۱۸/۴۵ درصد است.

ارائه شده است. در طول دوره راستی‌آزمایی باد غالباً شمال غربی است (۳۶۰° جهت غالب باد < ۲۷۰). در مدت راستی‌آزمایی مقایسه کیفی ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و دوره تناوب موج شاخص ( $T_s$ ) حاصل از مدل و داده‌های بویه و نیز تحلیل آماری این مقایسه‌ها در شکل ۶ و جدول ۴، نشان داده شده است.

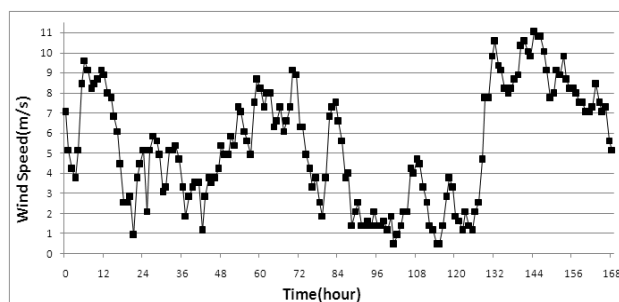
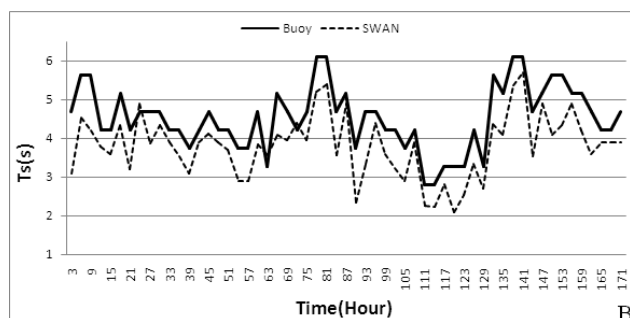
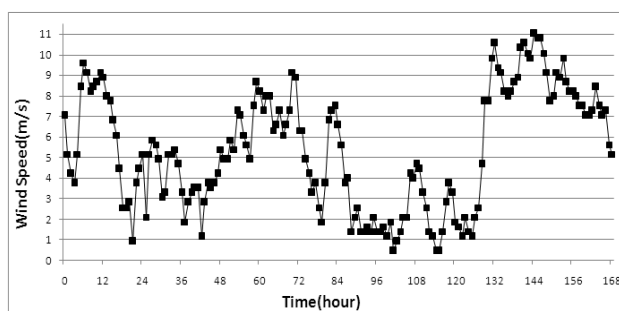
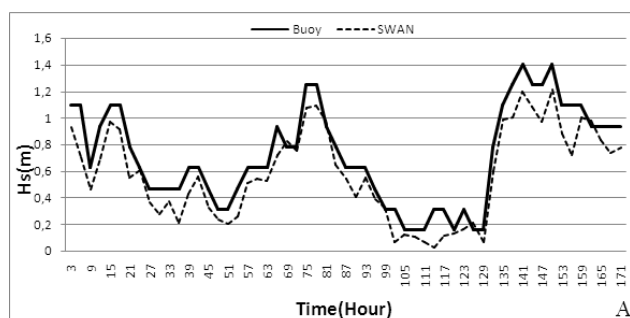
نتایج این تحقیق با نتایج معینی و همکاران که از مدل سوان برای بررسی پارامترهای موج در دریاچه اریه استفاده نموده‌اند؛ هم‌خوانی دارد. آنها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری دو دستگاه بویه در دو منطقه با عمق مختلف به بررسی و مقایسه پارامترهای موج پرداخته و نشان دادند که ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و دوره‌ی تناوب ( $T_s$ ) پیش‌بینی شده برای عمق زیاد، مقداری کمتر از مقدار واقعی ثبت شده توسط بویه در همان عمق است. در این

جدول ۳- مشخصه‌های آماری داده‌های باد بویه‌ی هواشناسی در مدت راستی‌آزمایی

Station	Wind Speed(m/s)				Wind Direction(Deg.)			
	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation
Buoy Measured	0.46	11.01	5.37	2.85	0	358.6	246.06	110.35

جدول ۴- نتایج بررسی آماری پیش‌بینی مدل سوان در مدت راستی‌آزمایی

$H_s(m)$				$T_s(sec)$			
Ave. Buoy	Ave. Model	Bias	SI	Ave. Buoy	Ave. Model	Bias	SI
0.72	0.58	-0.13	23.44	4.5	3.8	-0.70	18.45



شکل ۶- مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری شده (A) و دوره تناوب موج (B) توسط بویه و شبیه‌سازی شده با مدل سوان در مدت راستی‌آزمایی.

شکل ۵- تغییرات سرعت و جهت داده‌های باد بویه‌ی هواشناسی موج‌نگار در مدت راستی‌آزمایی

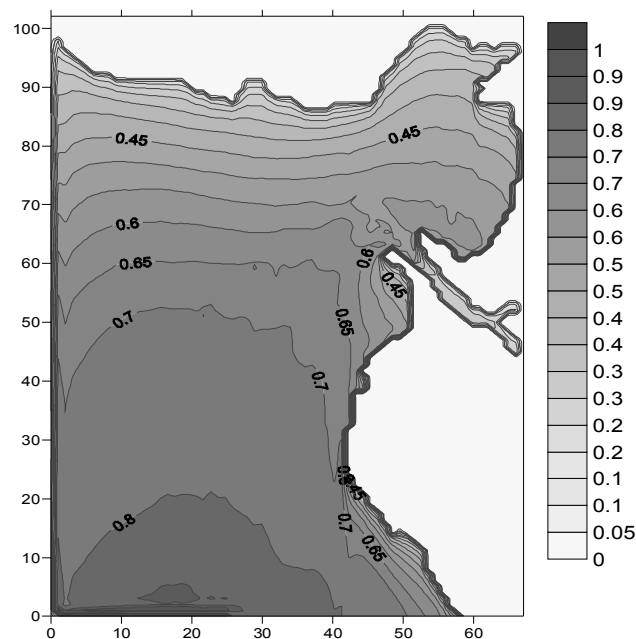
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مدل سوان در پیش‌بینی متغیرهایی مانند ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و دوره تناوب موج شاخص ( $T_s$ ) قابلیت خوبی در خلیج بوشهر دارد.
- اگرچه روند تغییر ارتفاع موج و دوره تناوب پیش‌بینی شده مدل سوان در خلیج بوشهر تطابق خوبی با داده‌های بویه هواشناسی دارد، اما مقادیر مدل کمی کمتر از مقادیر واقعی بویه است. به طوری که طی مدت راستی‌آزمایی، پارامتر Bias برای دوره‌ی تناوب و ارتفاع موج به ترتیب  $0.7-$  و  $1.3-$  متر و شاخص پراکندگی برای دوره‌ی تناوب و ارتفاع موج به ترتیب  $18/45$  و  $23/44$  درصد است. بنابراین سوان می‌تواند مدل مناسبی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی امواج در خلیج بوشهر باشد.
- خطای مدل می‌تواند به دلیل خطاهای موجود در ورودی‌های مدل (داده‌های عمق و باد) باشد.

#### منابع

- برگی، خ، ۱۳۷۹. اصول مهندسی دریا. سورنسن، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۳۲۹ صفحه.
- توفیقی، م.؛ ع.؛ زین‌الدینی، م.؛ گلشنی، ا.ع.، ۱۳۸۵. شبیه‌سازی دو بعدی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه برای تعیین الگوی جریان. نشریه مهندسی دریا، سال سوم، شماره ۴، صفحات ۳۷-۴۷.
- حاج بابایی، ن.، ۱۳۸۱. روش‌های پیش‌بینی امواج ناشی از باد، سمینار کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی. دانشگاه تربیت مدرس، ۳۵ صفحه.
- گلشاهی، ح.، ۱۳۸۵. بررسی مشخصه‌های امواج در خلیج فارس و دریای عمان. سمینار کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ۶۷ صفحه.
- گلشاهی، ح.، ۱۳۸۵. شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در یک حوضه‌ی دو لایه فرضی اقیانوسی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۵ صفحه.
- مدل‌سازی امواج دریاهای ایران، ۲۰۰۳. مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی. مقیمی، س.، ۱۳۸۳. ارائه مدل تلفیقی دینامیکی یک مدل موج طیفی و یک مدل مدطوفان در آب‌های ساحلی کم‌عمق. رساله دکترا، عمران هیدرولیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس.
- Army, U.S., 1984. Shore protection manual. 4th ed., 2 vols. Washington (DC); U.S. Army Engineer Waterways

از آن‌جا که تاکنون در مطالعات انجام شده با مدل سوان، در نظر گرفتن عمل آشیان‌سازی کمتر مورد توجه بوده است؛ لذا ویژگی مهم و بارز این تحقیق، انجام آشیان‌سازی روی سوان درشت (مدل سوان در خلیج فارس) و استخراج شرایط مرزی برای سوان ریز (مدل سوان در خلیج بوشهر) و شبیه‌سازی همزمان امواج در کل خلیج فارس با دقت ۲ دقیقه و در خلیج بوشهر با دقت ۲۵۰ متر است.

مدل سوان قادر است برخی پدیده‌های مربوط به موج مانند انکسار، تفرق و انعکاس را نیز توصیف نماید. علاوه بر این با تعریف نوسان‌های سطح آب و جریانات به‌عنوان ورودی مدل، می‌توان مدل را هرچه بیشتر به شرایط واقعی نزدیک‌تر کرد. در شکل ۷ نمونه‌ای از ارتفاع موج شاخص پیش‌بینی شده با مدل سوان در خلیج بوشهر ارائه شده است.



شکل ۷- نمونه‌ای از ارتفاع موج شاخص پیش‌بینی شده با مدل سوان در خلیج بوشهر

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه پارامترهای امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با داده‌های بویه اقیانوسی در این منطقه برای ۳۸۵ ساعت با استفاده از مدل سوان مورد بررسی قرار گرفت و مقدار خطای مدل برای پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و دوره تناوب موج شاخص ( $T_s$ ) محاسبه گردید. نتایج به‌دست آمده را به‌صورت کلی می‌توان به‌شکل زیر بیان کرد:



- Journal of Physical Oceanography, 14:1271–85.
- Lee, B.C.; Cheng, H.Y.; Kao, C.C.; Fan, Y.M., 2006. On the Estimation of Wind Wave of Taiwan Water by using Swan Wave Model. Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, May 28-June 2.
- Moeini, M.H.; Etemad-Shahidi A., 2007. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. Applied Ocean Research, 29: 137–145.
- Santos, J.A.; Coli, A.B.; Capitão, R.; Fortes, C.J., 2007. Wave forecast at the Tagus estuary by using the SWAN model. Proceedings of the Sixteenth, International Offshore and Polar Engineering Conference Lisbon, Portugal, July 1-6.
- Strauss, D.; Mirferendesk, H.; Tomlinson, R., 2007. Comparison of two wave models for Gold Coast, Australia. Journal of Coastal Research, ISSN 0749.0208, 312 – 315 pp.
- WAMDI group., 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography, 18: 1775-1810 pp.
- Experiment Station, U.S. Government Printing Office.
- Booij, N.; Haagsma, I.J.G.; Holthuijsen, L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van der Westhuysen, A.J.; Zijlema, M., 2009. User Manual of SWAN, Version 40.72. Delft University of Technology.
- Cavaleri, L.; Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. Journal of Geophysical Research., 86(C11):10961–74.
- Hasselmann, K.; Barnett, T.P.; Bouws, E.; Carlson, H.; Cartwright, D.E.; Enke, K.; Weing, J.A.; Gienapp, H.; Hasselmann, D.E.; Kruseman, P.; Meerburg, A.; Muller, P.; Olbers, K.J.; Richter, K.; Sell, W.; Walden, W.H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP)". Deutsche Hydrograph, Zeit., Erganzung-Self Reihe, A8(12).
- Kazeminezhad, M.H.; Etemad-Shahidi, A.; Mousavi, S.J., 2005. Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters. Journal of Ocean Engineering., 32, 1709-1725 pp.
- Komen, G.J.; Hasselmann, S.; Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed windsea spectrum.