

ارزیابی دو مدل عددی موج در پیش‌بینی ارتفاع امواج شمال دریای عمان

محمودرضا عباسی

phys.ocean.abbasi@gmail.com

استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه علوم دریایی امام خامنه‌ای، زیباکنار

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۲۵

چکیده

یکی از مهمترین پارامترهای بیان حالت دریا امواج هستند. اطلاع از مشخصه‌های امواج برای طرح ریزی فرآیندهای بلند مدت و نیز در اغلب فعالیت‌های دریایی اعم از ساحلی و فراساحلی از اهمیت زیادی برخوردار است. مایک ۲۱ و سوان دو مدل عددی موج نسل سوم هستند که بطور گسترده‌ای از آن‌ها در مدل‌سازی‌های عددی مورد نیاز کاربری‌های مهندسی و تحقیقات ساحلی استفاده شده است. در این تحقیق، قابلیت‌های این دو مدل موج در پیش‌بینی مشخصه‌های امواج در دو نقطه جاسک و چابهار در ناحیه شمالی دریای عمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا داده‌های هر دو مدل با داده‌های میدانی بویه‌های موج‌نگار مستقر در این دو نقطه مقایسه شده و با استفاده از روش‌های آماری تحلیل نتایج انجام شده است. نتایج، دقت بالای این دو مدل در پیش‌بینی مشخصه‌های امواج در هر دو نقطه را نشان می‌دهد. در منطقه جاسک، نتایج مدل مایک نسبت به مدل سوان، همبستگی بهتری با داده‌های بویه جاسک دارد و از دقت بالاتری برخوردار هستند، اما پراکندگی بیشتری دارند. در منطقه چابهار نیز، از نزدیکی بسیار زیاد مقادیر اریبی و نیز خطای جذر میانگین مربعی دو مدل و از طرفی کمتر بودن ضریب پراکندگی مدل مایک در مقایسه با مدل سوان، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مایک نتایج بهتری را در پیش‌بینی ارتفاع امواج در این منطقه ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل عددی مایک، مدل عددی سوان، امواج ناشی از باد، جاسک، چابهار

۱. مقدمه

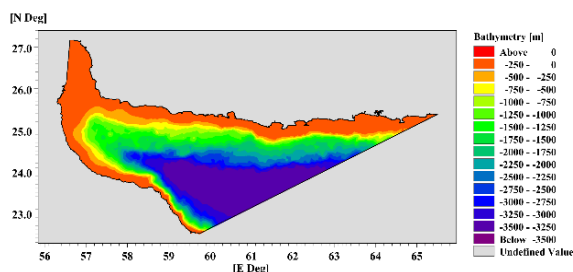
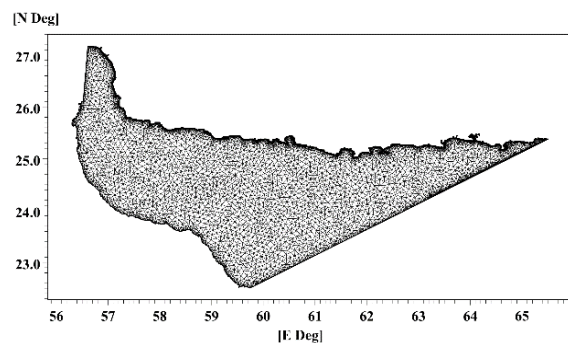
امواج ناشی از باد یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرودینامیکی در دریاها و اقیانوس‌ها هستند. دوره تناوب این امواج اغلب در بازه ۲۵-۳ ثانیه می‌باشد. رشد صنعت

حمل و نقل دریایی و احداث سازه‌های مختلف دریایی ضرورت پیش‌بینی این گونه از امواج را مشخص می‌نماید. ایران با دارا بودن حوضه‌های وسیع آبی و نیز به علت نیاز به بهبود، احداث و گسترش سازه‌های دریایی، در جهت

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

ناحیه مورد نظر برای مدل‌سازی عددی در این تحقیق، کل دریای عمان بین عرض‌های جغرافیایی ۲۲/۴ تا ۲۷/۳ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۶/۳ تا ۶۵/۵ درجه شرقی در نظر گرفته شده است. برای واسنجی^۱ و صحت‌سنجی^۲ مدل، تنها قسمت شمالی دریای عمان محدوده سواحل ایرانی آن در نظر گرفته شده است. داده‌های عمق نگاشت^۳ مورد نیاز برای تعیین موقعیت خطوط ساحلی و مرزهای باز مدل و نیز عمق نگاری منطقه از داده‌های بانک اطلاعات ETOPO1 با دقت ۱ دقیقه تهیه گردید. شکل ۱ عمق نگاری و شبکه بندی منطقه را برای هر دو مدل نشان می‌دهند.



شکل ۱: شبکه‌بندی (بالا) و عمق‌نگاری دریای عمان (پایین)

۲-۲. داده‌های اندازه‌گیری میدانی امواج

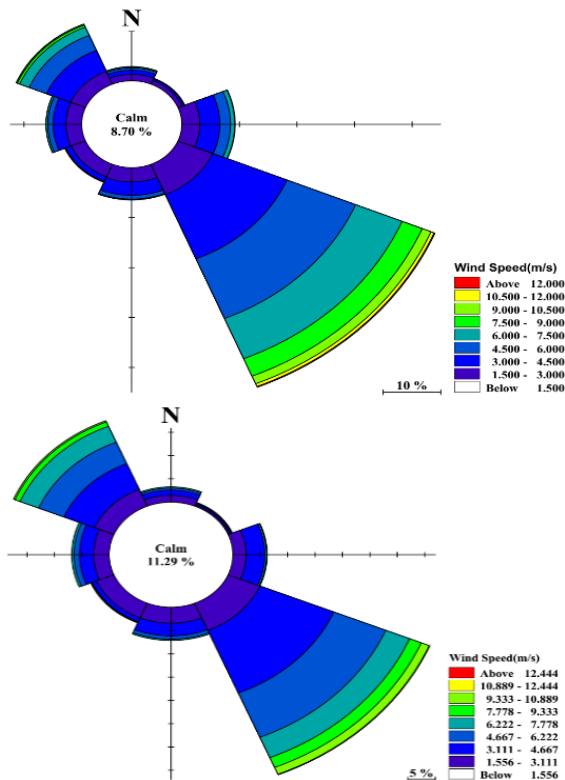
برای دستیابی به بهترین نتایج مدل‌سازی، مدل‌های عددی باید ابتدا واسنجی شوند. در دوره واسنجی، مدل مورد نظر با تنظیم پارامترهای درونی، باید به بهترین و نزدیک‌ترین مقدار به داده مرجع جهت واسنجی برسد. از داده‌های بویه‌های مستقر در دو ایستگاه در سواحل شمالی دریای عمان به عنوان داده‌های مرجع برای مدل‌سازی استفاده شد. این دو بویه یکی در چابهار به مختصات ۶۰/۵۴ درجه شرقی و ۲۵/۲۵ درجه

گسترش فعالیت‌های دریایی و بهره‌برداری بهینه از منابع دریایی کشور، لذا از اولویت‌های مراکز دریایی پیش‌بینی مشخصه‌های امواج می‌باشد. این امواج به دلیل اثرات جانبی متعددی که بر جای می‌گذارند در بسیاری از مطالعات دریایی در حوضه‌های مختلفی مانند مهندسی، اقتصادی، زیست محیطی، شیمی و زمین‌شناسی دریا مورد توجه هستند. در این فرآیندهای دریایی موضوع پیش‌بینی امواج از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع با استفاده از نتایج پس‌بینی امواج و اطلاع از مشخصه‌های طولانی مدت امواج، می‌توان اقلیم امواج ناحیه مورد مطالعه را تعیین نمود. از سوی دیگر پیش‌بینی مشخصه‌های امواج می‌تواند در طرح ریزی فعالیت‌های دریایی مؤثر بوده و از بروز خسارت‌های احتمالی جلوگیری کند. به همین علت در طی سال‌های زیاد، کوشش‌های فراوانی برای دستیابی به پیش‌بینی امواج با دقت‌های بالا صورت گرفته است. این پژوهش‌ها منتج به ارائه روش‌های مختلف شامل روابط تجربی و نیمه تجربی [۱-۴]، مدل‌های عددی [۵-۸] و روش‌هایی بر پایه محاسبات نرم [۹-۱۱] شده است. منظور از پیش‌بینی امواج، بدست آوردن سری‌های زمانی مشخصه‌های امواج مانند ارتفاع، پریود و جهت انتشار امواج بر اساس استفاده از روش‌های فوق است.

در این تحقیق برای پیش‌بینی مشخصه‌های امواج در سواحل شمالی دریای عمان با استفاده از روش مدل‌سازی عددی، از دو مدل عددی بسیار پرکاربرد سوان و مایک ۲۱ استفاده می‌شود. این دو مدل جهت مدل‌سازی مشخصات امواج در نواحی مختلف دریا‌های ایران مورد استفاده واقع شده‌اند که می‌توان گفت در اکثر مطالعات، نتایجی با دقت قابل قبول ارائه کرده‌اند [۱۲-۱۶].

در کار مشابهی که با استفاده از این دو مدل در منطقه خزر جنوبی [۱۷] صورت گرفت، دیده شد که دو مدل تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی داشته و شاخص‌های آماری نیز در محدوده آرمانی بوده و نتایج قابل قبولی را نشان داده‌اند که نشان دهنده دقت این دو مدل در شبیه‌سازی مشخصه‌های موج در آن منطقه بوده است.

شکل ۳ گلباد حاصل از داده‌های ECMWF را در بازه مدل‌سازی در دو نقطه چابهار و جاسک نشان می‌دهد.



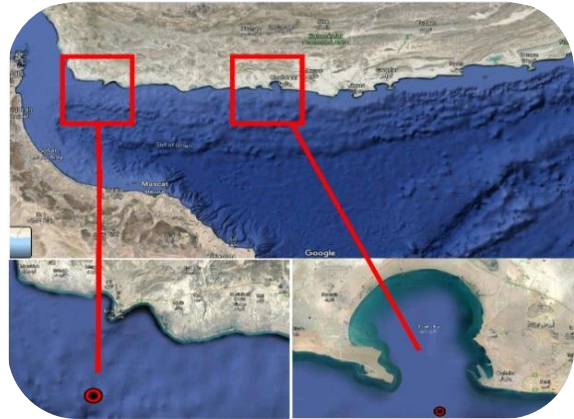
شکل ۳: گلباد داده‌های ECMWF در چابهار (بالا) و جاسک (پایین) در طی بازه مدل‌سازی

۲-۴. مدل سوان

مدل عددی موج سوان مدلی برای ارائه مشخصه‌های امواج در پهنه‌های آبی با ابعاد مختلف است. این مدل جهت اجرا نیازمند داده‌های باد، عمق‌نگاری منطقه مورد بررسی، تعیین نوع شبکه محاسباتی و شرایط مرزی و اولیه دارد. مدل سوان توانایی پیش‌بینی مشخصه‌های امواج مانند ارتفاع، دوره تناوب و جهت امواج باد را دارد. این مدل برای مدل‌سازی مشخصه‌های امواج در نواحی مختلف آبی ایران استفاده شده و نتایج قابل قبولی را تولید نموده است. این مدل هم بر روی شبکه منظم^۷ و هم شبکه نامنظم^۸ قابل اجرا است.

سوان، مدلی طیفی است که تولید امواج ناشی از باد، انتشار، انکسار، شکست، پدیده سفیدک رأس موج^۹، اندرکنش امواج با جریان‌ها، اندرکنش امواج با امواج، انتقال بخشی و انعکاس از سازه را در نظر می‌گیرد. این مدل، قابلیت شبکه بندی منحنی و ریز کردن شبکه را داراست و شرایط غیر

شمالی و دیگری در محدوده جاسک به مختصات ۵۷/۶۷ درجه شرقی و ۲۵/۳۵ درجه شمالی مستقر می‌باشند (شکل ۲).



شکل ۲: محدوده کل منطقه مورد نظر برای مدل‌سازی، پایین چپ و راست به ترتیب محل بویه چابهار و جاسک

۲-۳. داده‌های باد مورد نیاز

پارامتر اصلی در ایجاد امواج در پهنه‌های آبی باد است. بنابراین در فرآیند مدل‌سازی عددی، هرچه میدان بادی که به مدل به عنوان ورودی داده می‌شود از دقت و صحت بالاتری برخوردار باشد، نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر خواهند بود. در این راستا، یکی از بهترین منابع باد، داده‌های میدانی حاصل از ایستگاه‌های همدیدی^۴ محلی می‌باشند. اما با توجه به محدودیت‌های مکانی و زمانی این ایستگاه‌ها، بهترین منابع در این زمینه استفاده از داده‌های باد ماهواره‌ای است و در این میان داده‌های باد^۵ ECMWF یکی از بهترین انتخاب‌ها است که در بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مدل‌سازی از داده‌های باد باز تحلیل ERA-5^۶ از مدل باد ECMWF با گام زمانی ۶ ساعته و شبکه‌ای منظم با گام مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده شد. این داده‌های باد با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری اصلاح شده‌اند و خطای اولیه مدل باد پس از انجام پس پردازش‌های آماری حذف شده‌اند. بازه زمانی انتخاب داده‌های باد براساس زمان دسترسی به داده‌های موج‌نگارهای مستقر در چابهار و جاسک، از اول تا ۱۱ خرداد ۹۷ به مدت ۱۰ روزه تعیین گردید که ۵ روز اول برای واسنجی مدل و ۵ روز دوم برای صحت‌سنجی مدل معین

پایدار را نیز در نظر می‌گیرد.

مدل سوان یک مدل عددی نسل سوم کد باز برای شبیه‌سازی امواج است که در سال ۲۰۰۹ توسط دانشگاه صنعتی دلفت هلند توسعه یافته است [۶].

۲-۵. مدل مایک ۲۱

بسته نرم افزاری مایک ۲۱ برای مدل‌سازی امواج ناشی از باد از مدل استفاده می‌کند. مدل مذکور توسط موسسه هیدرولیک دانمارک توسعه داده شده و یک مدل معتبر در سطح جهانی است که تاکنون در بسیاری از مقالات و پروژه‌های معتبر علمی استفاده شده و کارایی آن در مدل‌سازی‌های متعدد مورد تأیید قرار گرفته است. کار کردن در فضایی راحت به همراه بازه وسیعی از امکانات و قابلیت‌ها و نتایج قابل اعتماد، از مهمترین ویژگی‌های این مدل است.

ماژول ۱ هیدرودینامیک جزء اساسی محاسباتی در کل ماژول‌ها مایک ۲۱ است و بعنوان مبنایی برای سایر ماژول‌ها شناخته شده است. خروجی این ماژول بعنوان ورودی سایر ماژول‌ها به کار گرفته می‌شود. به همین دلیل در انجام مدل‌سازی هیدرودینامیکی می‌باید دقت بالایی را صرف کرد. در این مدل، معادلات با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده‌اند و معادلات گسسته شده بر روی یک شبکه نامنظم حل می‌شوند. در مدل مایک FM3 مدل‌های آشفته‌گی متعددی برای محاسبه لزجت آشفته‌گی و اثرات آن بر جریان وجود دارند. همچنین این مدل به‌سادگی قادر است تا جریان در نواحی خشک و تر شونده را شبیه‌سازی نماید. در مدل مایک FM3 مش بندی در صفحه افقی بصورت بدون ساختار و در راستای عمودی بصورت با ساختار انجام می‌شود. مهم‌ترین مزیت استفاده از شبکه نامنظم، انعطاف‌پذیری آن می‌باشد که امکان استفاده از رزولوشن دلخواه در مناطق مورد نیاز را به کاربر می‌دهد.

این مدل عددی نسل سوم برای ارائه مشخصه‌های امواج با دقت بالا از شبکه‌بندی نامنظم استفاده می‌کند. این مدل، فرآیندهایی انتشار امواج در آب‌های عمیق مانند شکست امواج، سفیدک رأس موج، اصطکاک بستر،

اندرکنش غیرخطی چهارتایی، جفت شدگی میدان باد و موج را در مدل‌سازی امواج در آب عمیق در نظر می‌گیرد. همچنین برای مدل‌سازی در ناحیه کم عمق نیز فرآیندهایی مانند شکست امواج و نیز استهلاک انرژی در ناحیه شکست استفاده می‌شود [۷].

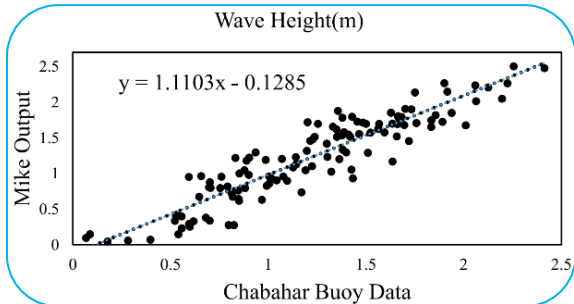
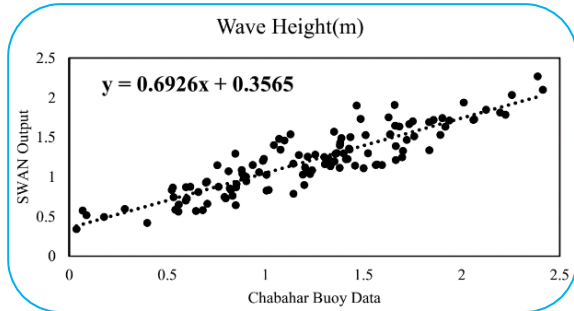
۲-۶. واسنجی مدل

در هر مدل‌سازی عددی برای کسب نتایج قابل اتکا، مدل نیازمند واسنجی است که در این دوره واسنجی سعی در به حداقل رساندن اختلاف مقادیر مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده با نتایج مدل دارد. بنابراین در این دوره یکی باید داده‌های معتبر میدانی در دسترس باشد و دیگر تنظیم درست ضرائب پارامترهای مختلف مدل عددی است.

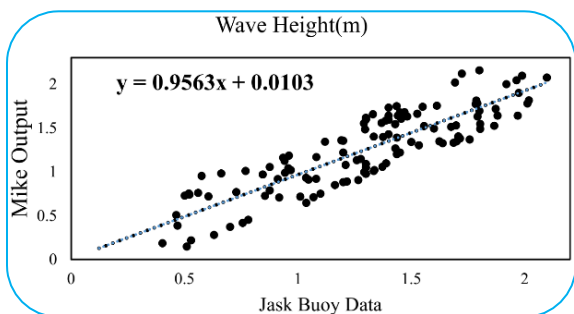
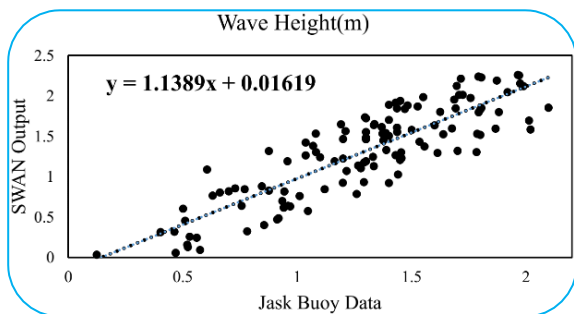
بررسی‌های نقطه‌ای در نقاط استقرار بویه با انطباق سری‌های زمانی در بازه‌های زمانی محدود و نیز محاسبه آماری این داده‌ها در دو نقطه یکی بویه چابهار به عنوان نماینده نقاط کم عمق ساحلی و دیگری بویه جاسک به عنوان نماینده نقطه عمیق دور از ساحل انجام شده است. در این تحقیق برای واسنجی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده ارتفاع موج حاصل از دو بویه در دو نقطه مورد مطالعه (چابهار و جاسک) با بازه زمانی ۱ ساعته و به مدت ۱۲۰ ساعت استفاده به عمل آمد.

برای مدل‌های نسل سومی مانند سوان و مایک ۲۱، از ضرائب متعددی مانند سفیدک رأس موج، ضریب زیری بستر، ضریب شکست موج برای واسنجی استفاده می‌شود. در پژوهش‌های صورت گرفته در تحلیل حساسیت ضرائب دو مدل در مناطق مختلف دریایی [۱۸-۲۱]، نشان داده شده است که ضریب سفیدک رأس موج در دوره‌های واسنجی بیشترین تأثیر را در بهبود نتایج مدل‌سازی داشته است. براین اساس در پژوهش حاضر در دوره واسنجی، هر دو مدل، براساس تغییر این ضریب تنظیم شدند. شکل‌های ۴ و ۵ سری زمانی ارتفاع موج حاصل از دو مدل و بویه‌ها را در چابهار و جاسک قبل و بعد از واسنجی نشان می‌دهند.

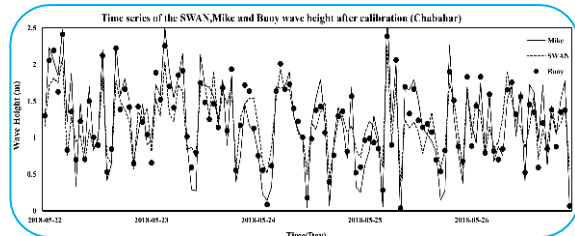
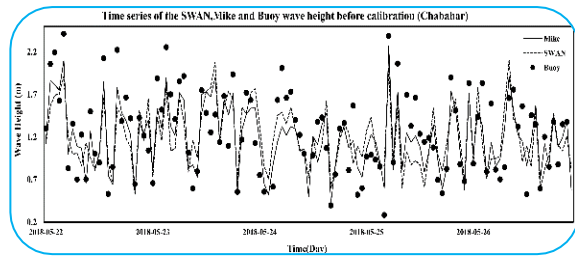
داده‌های بویه ارائه شد (شکل‌های ۵ و ۶). با رسم نمودار پراکندگی و برازش خطی که داده‌های هر دو مدل را با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی را شامل می‌شود، می‌توان رابطه خطی برازش داده را بدست آورد. این رابطه خطی علاوه بر بیان کمی ارتباط و نزدیکی بین دو منبع داده مختلف، می‌تواند ضریب اصلاحی بین دو منبع را نیز نشان دهد.



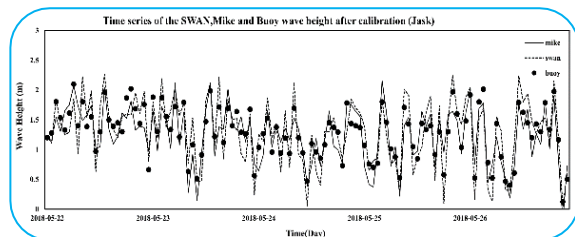
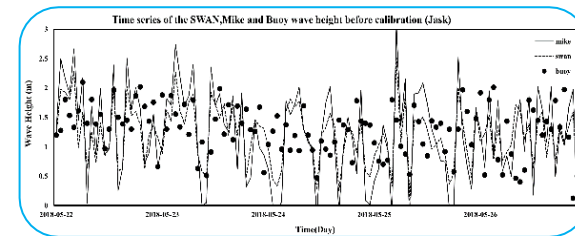
شکل ۱: نمودار پراکندگی ارتفاع موج سوان (بالا) و مایک (پایین) و داده‌های بویه پس از واسنجی (چابهار)



شکل ۲: نمودار پراکندگی ارتفاع موج سوان (بالا) و مایک (پایین) و داده‌های بویه پس از واسنجی (جاسک)



شکل ۴: سری زمانی ارتفاع موج چابهار حاصل از دو مدل و داده‌های بویه قبل (بالا) و بعد (پایین) از واسنجی



شکل ۵: سری زمانی ارتفاع موج جاسک حاصل از دو مدل و داده‌های بویه قبل (بالا) و بعد (پایین) از واسنجی

همانگونه که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود روند کلی ارتفاع موج هر دو مدل با داده‌های بویه در هر دو نقطه ساحلی (چابهار) و دور از ساحل (جاسک) با انجام فرآیند واسنجی و تنظیم ضریب سفیدک رأس موج، از انطباق خوبی برخوردار شده است. هر دو مدل در پیش‌بینی ارتفاع بلندترین موج‌ها در دوره واسنجی از دقت مناسبی برخوردار هستند.

جهت بررسی دقیق‌تر نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها و نیز برای بیان کمی میزان خطا ارتفاع موج مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی، برای هر دوره بطور مجزا، علاوه بر ترسیم سری زمانی نمودارها، نمودار پراکندگی نتایج مدل با

جدول ۲: پارامترهای خطا در دوره واسنجی ارتفاع موج جاسک

| پس از واسنجی | | پیش از واسنجی | | پارامتر خطا |
|--------------|--------|---------------|--------|-------------|
| سوان | مایک | سوان | مایک | |
| ۰/۰۱۷ | -۰/۰۴۶ | -۰/۰۷۶ | -۰/۰۵۳ | Bias(m) |
| ۸۷ | ۸۷ | ۱۳ | ۲۲ | R(%) |
| ۰/۲۹ | ۰/۲۴ | ۰/۶۱ | ۰/۸۰ | RMSE(m) |
| ۲/۸۱ | ۲/۱۸ | ۳/۶۵ | ۲/۸۳ | SI(%) |

در هر چهار مورد دیده می شود که با انجام واسنجی ضریب پراکندگی کاهش یافته است که نشان دهنده افزایش شبیه سازی دقیق ارتفاع امواج نسبت به داده های بویه می باشد. مقدار اریبی نیز به همین منوال کاهش یافته است که بیانگر نزدیکی میانگین داده های مدل ها با داده های میدانی در هر چهار وضعیت می باشد. با این حال مقدار مثبت و منفی این پارامتر در دوره واسنجی به ترتیب نشان از بالادست و پایین دست بودن نتایج مدل است.

۳. یافته ها

۳-۱. صحت سنجی و پیش بینی ارتفاع امواج

پس از فرآیند واسنجی مدل و تنظیم ضرائب آن ها برای بهینه سازی نتایج مدل ها با مقایسه آنها با داده های بویه های محلی، در این مرحله برای آزمایش مدل ها در بازه زمانی دیگری و بررسی قابلیت های آن در پیش بینی ارتفاع امواج، مدل ها با همان تنظیمات دوره واسنجی، مجدداً اجرا شدند.

در این دوره، بازه زمانی ۵ روزه ۶ الی ۱۰ خرداد براساس داده های موجود بویه محلی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۸ سری زمانی ارتفاع موج دو مدل را در محل دو بویه نشان می دهد.

بر اساس مدل سازی های انجام شده در این دوره و مقایسه نتایج آنها با داده های بویه ها، دیده می شود که هر دو مدل از دقت بالایی در مدل سازی ارتفاع امواج در ناحیه مورد مطالعه داشته اند. همچنین انطباق خوبی بین نتایج هر دو مدل با داده های میدانی وجود دارد و تغییرات ارتفاع موج در زمان به خوبی مدل سازی شده است.

شکل های ۶ و ۷ نشان می دهند پس از واسنجی، نتایج هر دو مدل در ۲ نقطه اندازه گیری، از پراکندگی بسیار خوبی (حول خط نیمساز) البته با اندکی اغماض در مورد سوان در چابهار برخوردار هستند. نزدیکی شیب خط به مقدار ۱، نشان از تنظیمات درست ضریب رأس سفیدک موج در هر دو مدل دارد. بقیه پارامترهای آماری نیز بهبود نتایج ناشی از واسنجی را نشان می دهند.

علاوه بر ترسیم داده ها، از پارامترهای آماری که نشان دهنده میزان انطباق نتایج مدل با نتایج اندازه گیری های میدانی است، استفاده به عمل آمد. این پارامترها شامل اریبی (Bias)، ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربع خطای (RMSE) و شاخص پراکندگی (SI) طبق روابط ۱ تا ۴ هستند.

$$Bias = \bar{x} - \bar{y} \quad (1)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

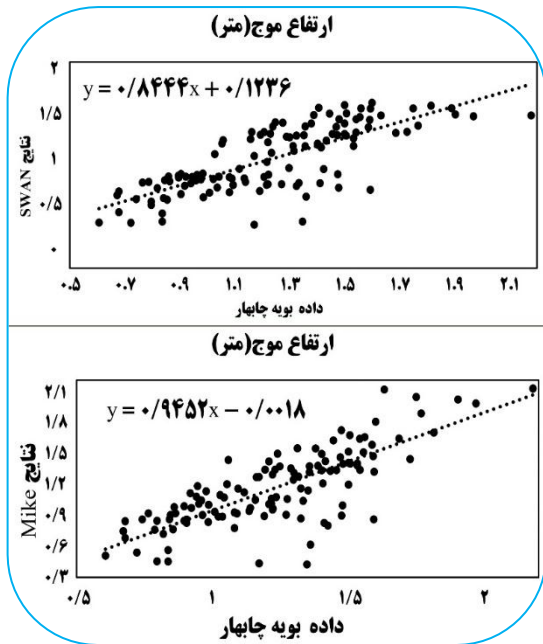
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}} \quad (4)$$

به طوری که در این روابط x و y به ترتیب ارتفاع موج اندازه گیری شده توسط بویه و مقادیر محاسبه شده توسط مدل است. جدول های ۱ و ۲ که براساس روابط ۱ تا ۴ بدست آمده اند، مقادیر پارامترهای آماری را قبل و بعد از واسنجی برای دو مدل در دو نقطه نشان می دهند.

جدول ۱: پارامترهای خطا در دوره واسنجی برای ارتفاع موج چابهار

| پس از واسنجی | | پیش از واسنجی | | پارامتر خطا |
|--------------|-------|---------------|--------|-------------|
| سوان | مایک | سوان | مایک | |
| -۰/۰۱۸ | ۰/۰۰۵ | -۰/۰۲ | -۰/۰۲۱ | Bias(m) |
| ۹۰ | ۹۳ | ۶۴ | ۸۶ | R(%) |
| ۰/۲۴ | ۰/۲۴ | ۰/۴۰ | ۰/۲۷ | RMSE(m) |
| ۲/۰۲ | ۱/۸۷ | ۳/۶۷ | ۲/۰۹ | SI(%) |



شکل ۴: نمودار پراکندگی ارتفاع موج سوان (پایین) و مایک (بالا) و داده‌های بویه در صحت‌سنجی (چابهار)

پارامترهای آماری ارتفاع موج پیش‌بینی شده توسط هر دو مدل در این دوره در مکان دو بویه در جدول ۳ ارائه شده است.

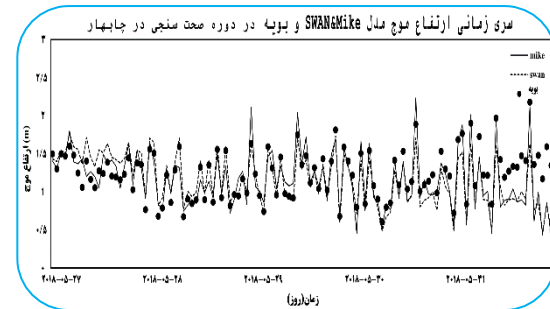
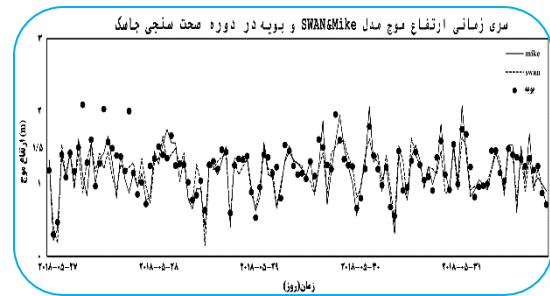
جدول ۲: پارامترهای خطا در دوره صحت‌سنجی برای ارتفاع موج

| صحت‌سنجی چابهار | | صحت‌سنجی جاسک | | پارامتر خطا |
|-----------------|--------|---------------|-------|-------------|
| سوان | مایک | سوان | مایک | |
| -۰/۰۶۹ | -۰/۰۴۷ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۵۵ | Bias(m) |
| ۷۶ | ۷۴ | ۶۹ | ۶۹ | R(%) |
| ۰/۲۴ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | RMSE(m) |
| ۲/۲۸ | ۳/۳۹ | ۲/۲۱ | ۲/۲۱ | SI(%) |

۴. نتیجه‌گیری

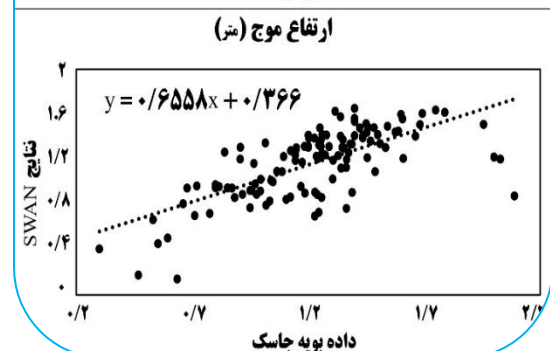
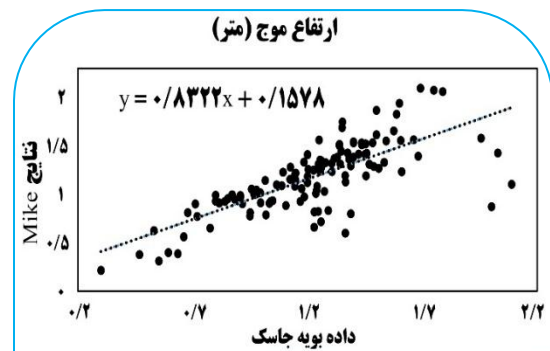
۴-۱. ناحیه جاسک

همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود در دوره صحت‌سنجی و پیش‌بینی امواج در منطقه جاسک، مدل مایک نسبت به مدل سوان از دقت بالایی برخوردار است به طوری که شیب خط عبوری از نقاط پراکندگی در این مدل به ۱ نزدیک‌تر است. همچنین با توجه به این که شیب خط در هر دو مدل در این ناحیه کمتر از ۱ است، نتیجه می‌شود که هر دو مدل در پیش‌بینی مقدار دست‌پایینی را



شکل ۳: سری زمانی ارتفاع موج جاسک (بالا) و چابهار (پایین) حاصل از دو مدل و داده‌های بویه در صحت‌سنجی

برای بیان کمی میزان دقت مدل‌ها در پیش‌بینی امواج، از نمودارهای پراکندگی امواج و پارامترهای آماری استفاده شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای پراکندگی نتایج مدل‌ها را براساس داده‌های بویه در دو ایستگاه نشان می‌دهند.



شکل ۹: نمودار پراکندگی ارتفاع موج سوان (پایین) و مایک (بالا) و داده‌های بویه در صحت‌سنجی (جاسک)

- Washington, DC: U.S Army Corps of Engineers; 2002. Engineer Manual 1110-2-1100.
- [3] Rusu E, Raileanu A. A multi-parameter data assimilation approach for wave prediction in coastal areas. *Journal of Operational Oceanography*. 2016;9(1):13-25.
- [4] Montoya RD, Arias AO, Royero JO, OcampoTorres FJ. A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds. *Ocean Engineering*. 2013; 67:100-18.
- [6] DHI Water & Environment. MIKE 21 spectral wave module, Scientific documentation. 2004.
- [7] Allahdadi MN, Chaichitehrani N, Allahyar M, McGee L. Wave Spectral Patterns during a Historical Cyclone: A Numerical Model for Cyclone Gonu in the Northern Oman Sea. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2017;7(02):131.
- [8] Booij NR, Ris RC, Holthuijsen LH. A thirdgeneration wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*. 1999;104(C4): 7649-666.
- [9] Rusu E. Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications. *Journal of Marine Science and Technology*. 2011;19(1):58-75.
- [10] Akdağ SA, Dinler A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy conversion and management*. 2009 Jul 1;50(7):1761-6.
- [۱۱] خالقی مژگان، راهبانی مریم. تعیین ارتفاع موج در ایستگاه بندر جاسک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. هفتمین همایش ملی صنایع فراساحل؛ خرداد ۱۳۹۶.
- [۱۲] دردیزاده بصیرآباد احمد، چگینی وحید، مهدیزاده، مهدی محمد، کامرانزاد بهاره. بررسی انرژی امواج در بندر امیرآباد دریای خزر با استفاده از نتایج مدل SWAN. علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۳؛۲(۱۳).
- [۱۳] محمودی ایوب، لشت نشانی سید احمد، منصوری عباس، شفاعی بجستان محمود. مدل سازی عددی انتقال رسوب در اطراف بندر نوشهر. دریا فنون. ۱۳۹۷؛ ۵(۳):۱۰۵-۱۱۶.
- [۱۴] چگینی وحید، چگینی فاطمه، گلشنی علی اصغر، تائبی سهیلا. امواج ناشی از باد و پیش بینی
- برای ارتفاع امواج پیش بینی می کنند.
- همچنین از نقطه نظر آماری و با نگاهی به پارامترهای جدول ۳ و بررسی نتایج دو مدل در ناحیه جاسک، با توجه به مقدار بسیار کوچک پارامتر اریبی برای هر دو مدل، می توان نتیجه گرفت که میانگین آماری نتایج دو مدل در این ناحیه از نزدیکی خوبی با داده های میدانی برخوردار است. در این خصوص مدل مایک دقت بالاتری دارد. از آنجا که هر چه خطای جذر میانگین مربعی و ضریب پراکندگی کمتر و ضریب همبستگی هر چه به ۱ نزدیک تر باشد، نتایج بهتر است می توان دید که نتایج مدل مایک نسبت به مدل سوان، دارای همبستگی بهتری با داده های بویه جاسک هستند، اما پراکندگی بالاتری دارند. همچنین خطای جذر میانگین مربعی هر دو مدل مقدار برابر و کم و قابل قبولی را نشان می دهد.
- ۴-۲. ناحیه چابهار**
- نتایج مدل سازی ارتفاع امواج براساس نمودار پراکندگی این منطقه، در شکل ۱۰ مشاهده می شود. باز هم در این منطقه با توجه به شیب خط عبوری از نقاط پراکندگی، دیده می شود که مدل مایک در پیش بینی ارتفاع امواج از توفیق بیشتری برخوردار است و نتایج نزدیکتری به داده های بویه می دهد. این مطلب را می توان با نگاهی به ضریب همبستگی دو مدل در جدول ۳ در منطقه چابهار نیز استنتاج کرد. با توجه به نزدیکی بسیار زیاد مقادیر اریبی و نیز خطای جذر میانگین مربعی دو مدل و از طرفی کمتر بودن ضریب پراکندگی مدل مایک در مقایسه با مدل سوان، می توان نتیجه گرفت که مدل مایک کاملاً نتایج بهتری را در پیش بینی ارتفاع امواج در این منطقه ارائه می نماید. البته نتایج بسیار خوب پارامترهای آماری در این منطقه توسط مدل سوان، قابلیت این مدل را در این منطقه نشان می دهد.

مراجع

- [1] US Army Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Corps of Engineers, US Govt. Manual, Shore protection. USA: Washington, DC; 1984. (vol.1)
- [2] Engineers UA. Coastal engineering manual.

پی‌نوشت

1. calibration
2. verification
3. bathymetry
4. Synoptic
5. European Centre for Meteorological Weather Forecasting
6. Reanalysis
7. Structured
8. Unstructured
9. White capping
10. Module

آن‌ها در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر. تهران: انتشارات مؤسسه ملی اقیانوس شناسی؛ ۱۳۹۱.

[۱۵] نجارپور محمدعلی، چگینی وحید، صدری نسب مسعود، کعبی عامر. خصوصیات طیف موج ناشی از باد در منطقه عسلویه. علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۱؛ ۴(۱۱): ۵۷-۶۳.

[۱۶] کمالی قراملکی سمیرا، حمزه ئی صمد. مدل سازی عددی ارتفاع امواج و شار جریان در سواحل غربی بندرعباس با استفاده از نرم افزار MIKE21. کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام؛ اردیبهشت ۱۳۹۷.

[۱۷] محمد مهدیزاده مهدی، حسن تبار سیدحسین. بررسی تأثیرپذیری مدل‌های MIKE21 و SWAN از تغییرات باد در شبیه سازی مشخصه موج در منطقه خزر جنوبی. دریافنون. ۱۳۹۶؛ ۴(۱): ۷۵-۸۵.

[۱۸] فرجامی حسین، حسینی سیدطالب، چگینی وحید، محمدی سیده سعیده. شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با مدل عددی سوان. اقیانوس شناسی. ۱۳۹۰؛ ۲(۸): ۷۹-۸۷.

[۱۹] رجبی سمانه، چگینی وحید، لاری کامران، کامران زاد بهاره، سید طالب حسینی. مدل سازی امواج ناشی از باد در منطقه انزلی با استفاده از مدل عددی SWAN. اقیانوس شناسی. ۱۳۹۲؛ ۴(۱۵): ۸۳-۹۲.

[۲۰] کامران زاد بهاره، اعتماد شهیدی امیر، چگینی وحید. پیش‌بینی امواج ناشی از باد در عسلویه با استفاده از مدل عددی SWAN. چهارمین همایش ملی صنایع فراساحل؛ اردیبهشت ۱۳۹۲.

[۲۱] طاهری حمید، کاظمی نژاد محمدحسین، یگانه بختیاری عباس. ارزیابی عملکرد مدل SWAN در پیش‌بینی امواج ناشی از باد خلیج فارس (مطالعه موردی: جزایر فارور و لاوان). اقیانوس شناسی. ۱۳۹۶؛ ۸(۳۲): ۴۳-۵۱.