بررسی مدل ایرانی PMO Dynamic در خلیج بوشهر، خلیج فارس

آرش بختیاری[1*]، فرشته کمیجانی[2]، محمدرضا الهیار[3]، محمود توکلی[4]

۱- شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، بخش مدل‌سازی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: abakhtiari@dena.kntu.ac.ir
۲- شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، بخش مدل‌سازی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: fereshtehkomijani@gmail.com
۳- سازمان بنادر و دریانوردی، اداره کل سواحل و بنادر، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: info@pmo.ir
۴- سازمان بنادر و دریانوردی، اداره کل سواحل و بنادر، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: info@pmo.ir

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۹۲/۵/۲۷

© نشریه علمی ـ پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۲، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

به‌دلیل کمبود اطلاعات اندازه‌گیری در بسیاری از مناطق ساحلی و دریایی، خصوصیات موج با استفاده از روش‌های مختلف تخمین زده می‌شود. پروژه‌های دریایی پیش‌بینی/ پیش‌یابی اقلیم موج غالباً توسط مدل‌های عددی یا روش-های تجربی انجام می‌شود. تاکنون نیز روش‌های تجربی مختلفی برای پیش‌یابی امواج گسترش یافته‌اند که توسط مهندسین و محققین مورد استفاده قرار می‌گیرند. با گسترش پردازنده‌هایی با سرعت بیشتر، مدل‌های عددی پیچیده‌ی مختلف برای پیش‌بینی موج گسترش یافته است. این مدل‌ها غالباً مدل‌های موج طیفی میانگین‌گیری شده‌ی فازی هستند که در سه نسل گسترش یافته‌اند. در دو دهه‌ی اخیر نیز، مدل‌های موج نسل سوم به‌طور گسترده در پروژه‌های علمی و مهندسی به‌کار رفته است. سازمان بنادر و دریانوردی اقدام به‌عنوان بخشی از سه فاز اولیه پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل ایران، نسبت به توسعه و پایه گذاری مدل PMO Dynamic اقدام نموده است. بسته نرم افزاری PMO Dynamic برای کاربرد در پروژه‌های مختلف با اهداف مهندسی و علمی توسعه یافته است. این بسته از چندین زیر برنامه تشکیل یافته است که برای اهداف مختلف قابل کار برد است. مدل موج موجود در این نرم افزار به‌منظور تولید و انتقال امواج ناشی از باد در نواحی ساحلی به‌کار برده می‌شود. در این مقاله، به قابلیت‌های مدل PMO در پیش‌بینی پارامترهای موج خلیج بوشهر پرداخته شده و مقایسه جامعی بین نتایج مدل موج ایرانی با مدل شناخته شده MIKE21 SW و داده‌های اندازه‌گیری انجام شده است.

کلمات کلیدی: *مدل موج، خلیج بوشهر، PMO Dynamic، Mike 21SW، مشخصات موج.*

۱. مقدمه

امروزه کاربرد مدل‌های عددی در کنار اندازه‌گیری‌های میدانی، به بخش جدایی‌ناپذیر در پروژه‌های دریای بدل شده است. ضرروت این امر با توجه به هزینه‌های بالای اندازه‌گیری‌های گسترده میدانی و موانع موجود از قبیل محدودیت دستگاه‌های اندازه‌گیری و بودجه‌های اختصاصی هر روز بیشتر و بیشتر احساس می‌شود. همچنین بررسی‌های بلندمدت و پیش‌بینی

پارامترهای دریایی از قبیل مشخصه‌های امواج و جریان‌های دریایی نیازمند حل معادلات پیچیده‌ی ریاضی و تحلیلی است که محاسبه‌ی آنها تنها از طریق مدل‌های ریاضی قابل انجام است. به همین جهت استفاده از مدل‌های عددی در زمینه‌های مختلف علوم دریایی امری ضروری به‌نظر می‌رسد که امکانات فراوانی را در اختیار مهندسین و کارشناسان این رشته قرار می‌دهند. به همین جهت، و با توجه به نیاز موجود در این زمینه مراکز مختلف علمی و تحقیقاتی با صرف بودجه‌های قابل توجه اقدام به گسترش و توسعه مدل‌های عددی مختلفی با قابلیت‌های متفاوت در این زمینه کرده‌اند.

در این میان، مدل‌سازی امواج به لحاظ تاثیر آن بر پارامترهایی از قبیل جریان‌های دریایی، محاسبات سازه‌های دریایی و میزان اتقال رسوب از اهمیت ویژه و بالایی برخوردار است. در این زمینه پروژه‌های دریایی پیش‌بینی/ پیش‌یابی اقلیم موج غالباً توسط مدل‌های عددی یا روش‌های تجربی انجام می‌شود. تاکنون نیز روش‌های تجربی مختلفی برای پیش‌یابی امواج گسترش یافته و توسط مهندسین و محققین مورد استفاده قرار گرفته است. با گسترش پردازنده‌هایی با سرعت بیشتر، مدل‌های عددی پیچیده‌ی مختلف برای پیش‌بینی موج گسترش یافته است. این مدل‌ها غالباً مدل‌های موج طیفی میانگین‌گیری شده‌ی فازی هستند که در سه نسل گسترش یافته‌اند. در دو دهه‌ی اخیر نیز، مدل‌های موج نسل سوم به‌طور گسترده در پروژه‌های علمی و مهندسی به‌کار رفته است (Hasselmann et al., 1973; Bretschneider, 1970; Donelan et al., 1980; SPM, 1984; Wilson, 1965; DHI, 2007; SWAN, 2010; CEM, 2003; Tolman, 1999).

سازمان بنادر و دریانوردی نیز در همین راستا به‌عنوان متولی بخشی از امور دریایی در کشور اقدام به بومی سازی دانش شبیه‌سازی پارامترهای دریایی از قبیل مدل سازی مشخصات موج نموده است (www.pmo.ir). مدل عددی PMO Dynamic به‌عنوان ابزار عددی توسعه یافته در این زمینه توسط این ارگان دریایی تهیه و توسعه یافته است. در این مقاله سعی شده تا با معرفی مقایسه نتایج مدل PMO Dynamic با مدل‌های شناخته شده در این زمینه از قبیل مدل MIKE2 SW از بسته نرم افزاری MIKE که توسط موسسه هیدرودینامیک دانمارک (DHI) توسعه یافته است، به بررسی قابلیت‌های آن پرداخته شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. شرح مدل

هدف اصلی مدل موج PMO Dynamic حل معادله تعادل عمل موج به‌منظور استخراج چگونگی توزیع مشخصات موج در مختصات جغرافیایی است. معادله مذکور پدیده‌های فیزیکی از قبیل انتشار موج، انکسار موج، خیزآب موج، ایجاد و رشد موج، افت موج و همچنین برهمکنش غیرخطی موج–موج را در بر می‌گیرد.

از مدل موج طیفی حاضر می‌توان به‌منظور پیش‌بینی شرایط موج در مقیاس‌های بزرگ (اقیانوسی) و یا کوچک (ساحلی) استفاده کرد. همچنین در این مدل امکان استفاده از هر دو نوع شبکه‌بندی منظم و نامنظم بسته به مشخصات محدوده جغرافیایی مورد مطالعه وجود دارد.

در مدل موج طیفی حاضر، معادله حاکم با استفاده از روش Time Splitting گسسته و در چند گام حل می‌شود. در گام نخست مولفه‌های مختلف ترم انتقال به‌صورت صریح و با استفاده از روش‌های با درجه دقت بالا حل می‌شوند و سپس در گام بعدی چشمه–چاه‌ها حل می‌شوند و بسته به اینکه مثبت یا منفی باشند، به‌ترتیب به‌صورت صریح و یا ضمنی در معادله وارد می‌شوند. این روند برای هر دو نوع شبکه‌ی منظم و نامنظم اعمال شده است.

معادله حاکم در این مدل معادله تعادل عمل موج است (رابطه ۱) که در فضای طیفی براساس آنچه در مرجع (Komen et al., 1994) ارائه شده قابل استفاده است.

$$\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial \mathrm{c_{gx}N}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial \mathrm{c_{gv}N}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial \mathrm{c_{\sigma}N}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial \mathrm{c_{\theta}N}}{\partial \mathrm{t}}=\frac{\mathrm{S}}{\sigma} \qquad \text{رابطه ۱}$$

در این معادله $N(\mathbf{x},\sigma,\theta,t)$ چگالی عمل موج، $\mathbf{x}(x,y)$ مختصات جغرافیایی، $\mathbf{v}(c_{gx},c_{gy},c_{\sigma},c_{\theta})$ مولفه‌های سرعت انتقال یک گروه موج، σ فرکانس نسبی زاویه ای و θ جهت انتقال موج است.

در این مدل مشخصات موج به‌وسیله‌ی انتگرال‌گیری از طیف چگالی عمل موج که با چگالی انرژی موج نسبت مستقیم دارد، به‌دست آمده است. سمت چپ معادله مشتق کامل چگالی عمل موج است که شامل تغییرات مکانی چگالی عمل موج و همچنین تغییرات طیفی چگالی عمل موج است.

۲-۲. بررسی کاربرد مدل در خلیج بوشهر

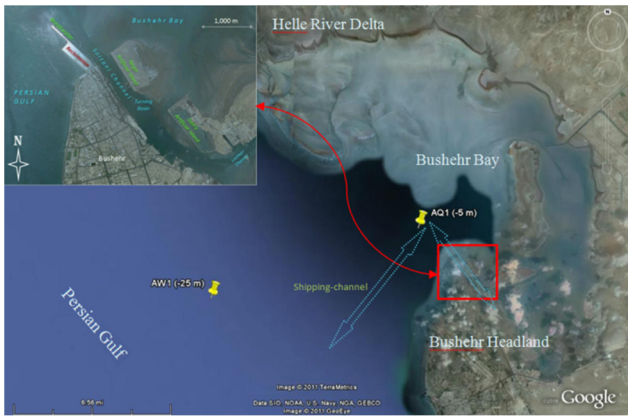
همان‌گونه که پیشتر نیز ذکر شد، به‌منظور بررسی مدل توسعه داده شده PMO Dynamic، این مدل در منطقه‌ی خلیج بوشهر مورد استفاده قرار گرفته و نتایج با داده‌های اندازه‌گیری، بررسی و صحت‌سنجی شده است. همچنین به‌منظور مقایسه مدل مورد استفاده با مدل‌های عددی پر کاربرد در این زمینه مدل موج نسل سوم موج MIKE21 SW انتخاب و نتایج آن با مدل PMO مقایسه شده است تا توانمندی مدل PMO Dynamic نسبت به مدل های پرکاربرد بین المللی سنجیده شود. مدل SW یکی از مدل‌های موج طیفی است که به‌طور گسترده‌ای در مهندسی سواحل به‌منظور مطالعات تحقیقاتی و نیز مطالعات مهندسی تواماً استفاده می‌شود (DHI., 2007). این مدل به‌خصوص برای کاربردهای ساحلی طراحی شده است و می‌تواند هم در شرایط آزمایشگاهی و هم در مقیاس اقیانوسی به‌کار رود. تحقیقات انجام شده توسط Sørensen و همکاران (۲۰۰۴) کارایی این مدل را در برخورد با مسایلی با مقیاس‌های مختلف ارائه نموده و تطابق خوبی بین نتایج مدل و اندازه‌گیری‌ها محلی ارائه داده است. لازم به ذکر است که مبنای مطالعات موج مدل PMO همچون مدول SW نرم‌افزار Mike21، معادلات بقای عمل موج است که تأثیر پارامترهای مختلف از طریق ترم‌های چشمه و چاه انرژی در این مدل‌ها لحاظ می‌شود.

۳. منطقه مورد مطالعه

بررسی‌ها انجام شده در ین پروژه در منطقه‌ی خلیج بوشهر انجام شده که بندر مهم تجاری بوشهر در آن واقع شده است. بندر بوشهر در انتهای خور سلطانی که در جنوب خلیج بوشهر قرار دارد، واقع شده است (شکل ۱). این بندر به‌وسیله‌ی یک کانال کشتیرانی که به دو بخش داخلی و خارجی تقسیم می‌شود، به خلیج فارس متصل شده است. این بندر به‌عنوان یکی از مناطق ویژه در پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی بخش‌هایی از سواحل استان بوشهر مورد توجه قرار گرفته است.

۳-۱. ورودی‌های مدل‌سازی

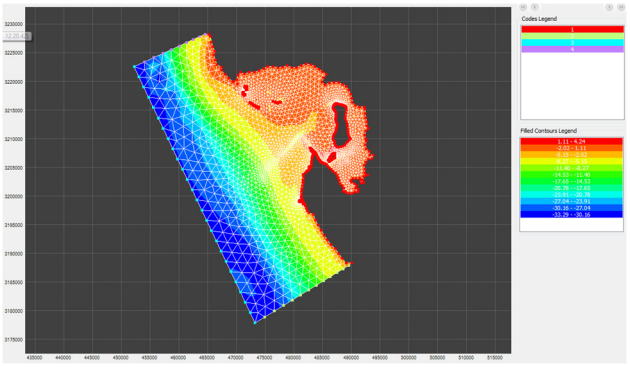
همان گونه که ذکر شد، منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از فاز سوم پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی بخش‌هایی از سواحل کشور است (JWERC., 2011). اندازه‌گیری‌های مشخصه موج از قبیل، ارتفاع موج شاخص (Hs)، پریود اوجی (Tp) و جهت موج (MWD) در طول سال ۲۰۱۰ در محل آب کم‌عمق (دستگاه AQ1) و همچنین در محل آب عمیق (دستگاه AW1) جهت تأمین ورودی موج آب عمیق به مدل‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۱). داده‌های باد ایستگاه همدیدی (سینوپتیکی) بوشهر ساحلی نیز به‌طور همزمان تهیه شده است. شبکه‌ی محاسباتی با استفاده از زیر برنامه Domain مدل PMO (شکل ۲) برای به‌کارگیری در هر دو مدل ذکر شده، تهیه شده است. با انتخاب ۵ دوره‌ی زمانی از سال ۲۰۱۰ (شکل ۳) و بررسی مشخصه‌های موج و باد در آنها، واسنجی مدل ایرانی (برای پارامترهای مختلف همچون زبری بستر، نیروی باد، تراز سطح و غیره) از طریق مقایسه‌ی نتایج مشخصه موج حاصل از مدل با مقادیر اندازه‌گیری موج در محل دستگاه AQ1 در هر دوره انجام شده است و سپس شرایط نهایی مدل‌سازی (جدول ۱) با انجام صحت‌سنجی مدل موج PMO تعیین شده است. قابل ذکر است که دوره‌های شبیه سازی به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نماینده‌ای از هر فصل انتخاب شده و علاوه بر آن دوره‌های فوق دارای بیشینه ارتفاع موج بوده‌اند.



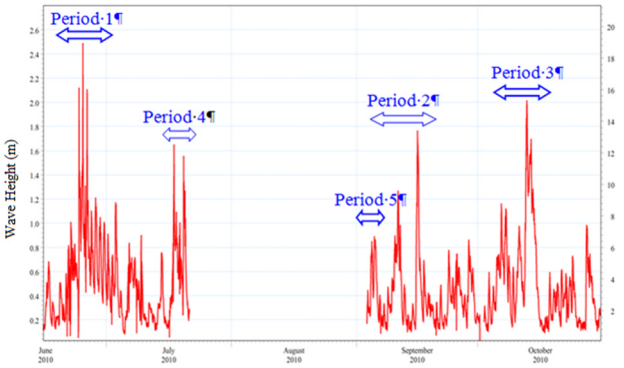
شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای بندر بوشهر به همراه نقاط اندازه‌گیری مشخصه موج

جدول ۱- شرایط مورد استفاده در مدل سازی امواج خلیج بوشهر

مدل	توضیحات	فرمولاسیون طیفی معادلات	فرمولاسیون زمانی معادلات	شرایط اولیه موج	شرایط مرز	
انتقال موج	بدون زبری، n=۵، پارامترهای شکست به‌صورت پیش‌فرض	Fully Spectral	Instationary Formulation	طول بیشینه‌ی بادگیر: ۱۰۰۰۰۰ (m) پریود اوجی بیشینه: ۰/۴ (hz) ثابت بیشینه‌ی فیلیپس: ۰/۰۰۸۱	مرز غربی باز با ورودی مشخصات موج اندازه گیری شده در AW1	مرزهای شمالی و جنوبی به صورت مرز کناری



شکل ۲- هیدروگرافی و شبکه‌ی مورد استفاده در مدل‌ها که ناحیه‌ی کانال و در نزدیکی سازه‌های مهم به‌صورت محلی ریزتر شده است.

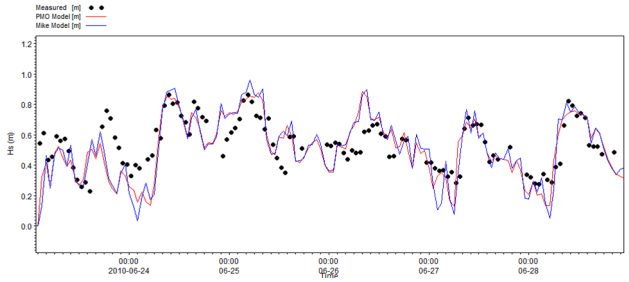


شکل ۳- رخداد انتخاب شده از اندازه‌گیری‌های AW1

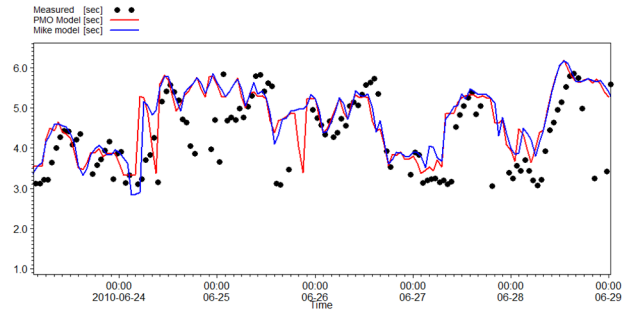
۳-۲. مدل‌سازی و مقایسه نتایج

همان‌طور که عنوان شد، به‌منظور بررسی توانمندی مدل ایرانی و ارزیابی دقت آن، پس از انجام مدل‌سازی موج با شرایط جدول ۱ توسط مدل ایرانی و Mike21-SW، نتایج آنها مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها شامل: مقایسه روند تغییرات سری زمانی مشخصه‌های موج حاصل از مدلها با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل دستگاه آب کم‌عمق برای هر دوره بوده است. مقایسه‌ی فوق برای مشخصه‌های ارتفاع، پریود اوجی و جهت میانگین موج در هر بازه انجام و نتایج تحلیل شده‌اند.

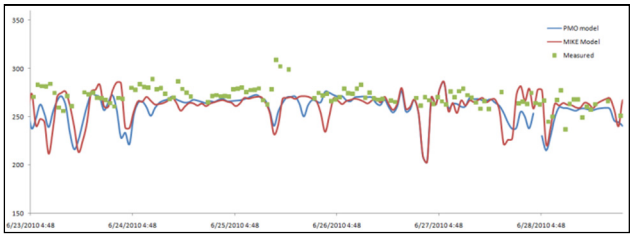
نتایج مدل به‌عنوان نمونه برای دوره‌ی اول مدل‌سازی در شکل‌های ۴ تا ۷ ارائه شده است. همچنان که از شکل ۴ بر می‌آید در دوره‌ی اول اندازه‌گیری، ارتفاع موج در دو مدل انطباق قابل قبولی با داده‌های اندازه‌گیری از خود نشان داده‌اند. همچنین در این دوره، هر دو مدل تغییرات پریود امواج را برای موج‌های مختلف به‌خوبی شبیه‌سازی نموده‌اند (شکل ۵). تغییرات جهتی موج اندازه‌گیری شده در محل دستگاه AQ1 و خروجی‌های مدل در شکل ۶ مقایسه شده‌اند که انطباق خوبی را ارائه کرده است. مقایسه نتایج دو مدل در شکل ۷ نشان می‌دهند که مدل PMO در ارتفاع‌های کوچکتر موج اندازه‌گیری شده مقادیر بیشتری را نسبت به مدل SW پیش‌بینی نموده است. این موضوع برای امواج با ارتفاع بیشتر، در این مدل کمتر دیده شده است.



شکل ۴- مقایسه‌ی ارتفاع موج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی توسط مدلهای PMO و SW در موقعیت دستگاه AQ1- دوره اول



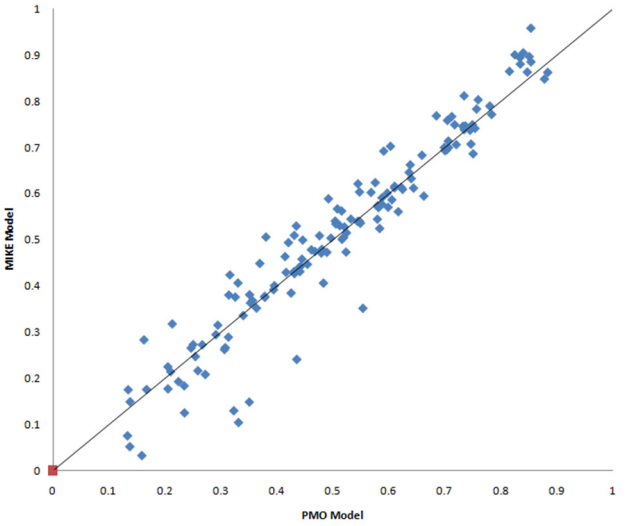
شکل ۵- مقایسه پریود موج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی توسط مدل‌های PMO و SW در موقعیت دستگاه AQ1- دوره اول



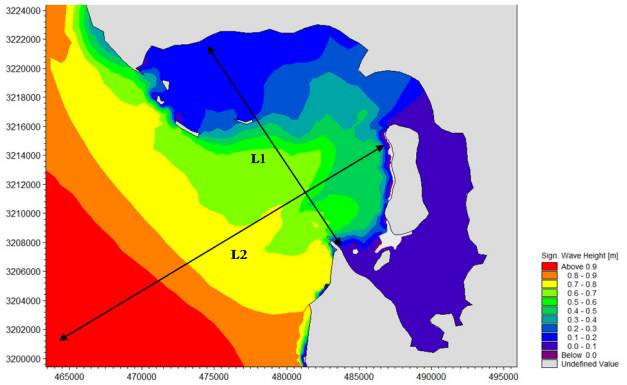
شکل ۶- مقایسه جهت موج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی توسط مدل‌های PMO و SW در موقعیت دستگاه AQ1- دوره اول

به‌منظور بررسی همه جانبه نتایج مدل، خروجی‌ها در دو حالت یک بعدی و دو بعدی نیز کنترل و تحلیل شده‌اند. شکل‌های ۸ و ۹ به‌عنوان نمونه، نتایج الگوی انتقال امواج را برای یک موج مشخص در دوره‌ی سوم شبیه‌سازی ارائه نموده‌اند.

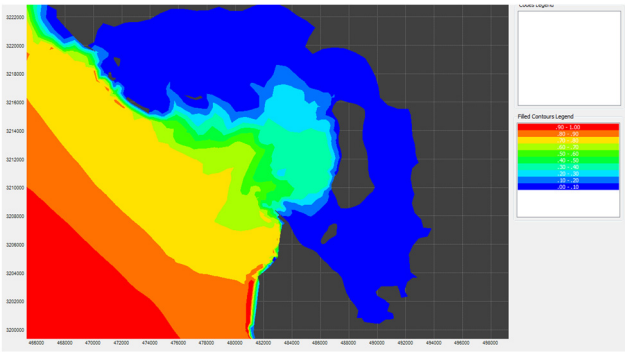
بررسی این نتایج نشان می‌دهد که مدل PMO Dynamic به‌خوبی توانسته الگوی انتقال و توزیع امواج را در محدوده خلیج بوشهر شبیه‌سازی نماید.



شکل ۷– مقایسه نتایج ارتفاع موج مدل PMO و مدل MIKE21-SW در دوره اول شبیه‌سازی

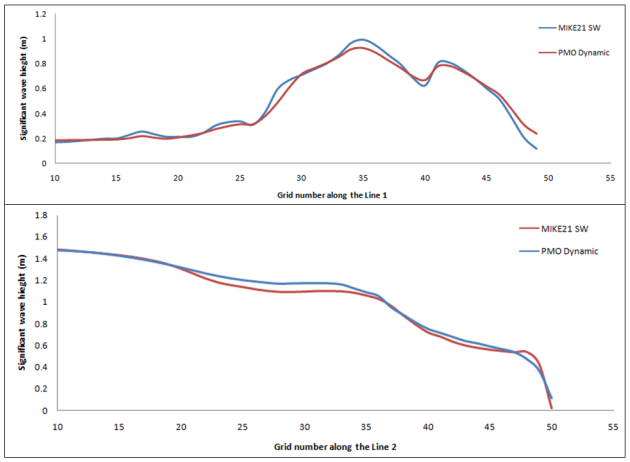


شکل ۸– الگوی انتقال امواج برای ارتفاع ۱/۵ متر، پریود ۶ ثانیه و جهت ۲۸۷ درجه در دوره سوم مدل‌سازی توسط مدل SW



شکل ۹– الگوی انتقال امواج برای ارتفاع ۱/۵ متر، پریود ۶ ثانیه و جهت ۲۸۷ درجه در دوره سوم مدل‌سازی توسط مدل PMO

همچنین نمونه‌ای از مقایسه‌ی تغییرات مشخصه‌های موج برای دوره‌ی سوم شبیه‌سازی در راستای خطوط L1 و L2 که در شکل ۹ مشخص شده است برای موج بیشینه‌ای با ارتفاع ۱/۵ متر، پریود ۵ ثانیه و جهت ۳۱۰ درجه در شکل ۱۰ ارائه شده است. همچنین مقایسه‌ی همزمان الگوی انتقال ارتفاع موج در طول خطوط L1 و L2 برای مدل PMO و SW در زمان رخداد موجی با ارتفاع ۱/۲ متر، پریود ۴/۷ ثانیه و جهت ۳۱۰ درجه در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰– مقایسه هم‌زمان الگوی انتقال ارتفاع موج در طول خطوط L1 و L2 برای مدل PMO و SW– دوره اول

۴. بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی بررسی مدل ایرانی PMO و مدل شناخته شده MIKE 21 SW در این بخش مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به‌منظور مقایسه‌ی دو مدل با داده‌های موجود در خلیج بوشهر اقدام به ساخت مدل شده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌های شده در فاز سوم پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل کشور (استان بوشهر) به بررسی نتایج دو مدل پرداخته شده است. همچنین نتایج مدل ایرانی PMO با نتایج مدل MIKE 21 SW مقایسه شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که روند تغییرات مشخصه‌های موج در محل اندازه‌گیری‌ها تا حدود زیادی در دو مدل مشابه و همخوان با داده‌های اندازه‌گیری است. جدول ۲ نتایج مقایسه خروجی دو مدل در محل دستگاه AQ1 را ارائه نموده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که دو مدل در نقطه‌ی مورد نظر از هم‌خوانی بالایی برخوردار بوده‌اند و نتایج نسبتاً یکسانی را ارائه کرده‌اند.

جدول ۲- مقایسه‌ی آماری نتایج حاصل از مقایسه مدل PMO و مدل SW در محل دستگاه AQ1

شماره بازه	$SW_{average}$	$PMO_{average}$	CC	RMSE	SI
۱	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۹۶	۰/۰۶	۰/۱۴
۲	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۹۴	۰/۰۶	۰/۲۵
۳	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۹۸	۰/۰۶	۰/۱۴
۴	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۹۸	۰/۰۵	۰/۱۴
۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۱۷

همچنین بررسی الگوی انتقال موج در دو مدل برای دوره‌های مختلف مدل‌سازی نشان می‌دهد که مدل ایرانی روند مشابهی را با مدل MIKE 21 SW ارائه کرده است. با توجه به کاربرد مدل MIKE 21 SW در پروژه های مختلف ملی و بین‌المللی به‌نظر می‌رسد که مدل موج ایرانی PMO نیز به خوبی قادر به شبیه‌سازی الگوی انتقال امواج در محیط های دریایی خواهد بود.

منابع

Bretschneider, CL., 1970. Wave forecasting relations for wave generation. Look Lab, Hawaii. 1 (3).

Delft University of Technology., 2010. SWAN USER MANUAL. Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences Environmental Fluid Mechanics Section.

DHI Water and Environment., 2007. MIKE 21 spectral wave module. Scientific documentation.

Donelan, M, A., 1980. Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions. In: Proceedings of Canadian coastal conference, National Research Council of Canada, 47–61.

Donelan, M.A.; Hamilton, J.; Hui, W.H., 1985. Directional spectra of wind-generated waves. Philos Trans R Soc Lond, A315:509–62.

Hasselmann, K.; Barnett, T.P,; Bouws, E.; Carlson, H.; Cartwright, D.E.; Enke, K.; 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP). Deutsche Hydrogr, Z. Erganzungself Reihe, A 8(12).

JWERC., 2011. Measurements report-Phase III, 2011, Monitoring and Modeling Studies Boshehr Province Coasts Ports and Maritime Organization of Iran.

Komen, G.J., 1996. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, Great Britain, 113-143 pp.

Sørensen, O.R.; Kofoed-Hansen, H.; Rugbjerg, M.; Sørensen, L.S., 2004. A thirdgeneration spectral wave model using an unstructured finite volume technique, International conference of coastal engineering (ICCE).

SWAN., 2010. Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. available from http://www.swan.tudelft.nl, Version 40.81.

Tolman, H. L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note 166, 110.

U.S. Army., 1984. Shore protection manual. Washington (DC), U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, 4th ed, 2 vols.

Army, U.S., 2003. Coastal engineering manual. Chapter II-2. Meteorology and wave climate, Engineer manual 1110-2-1100, Washington (DC), U.S. Army Corps of Engineers:.

Wilson, B.W., 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959. Deutsche Hydrogr. Z, 18(3):114–30.

www.PMO.ir