ارزیابی قابلیت مدل ایرانی PMODynamics
درشبیه‌سازی امواج (مطالعهٔ موردی بندر گوردیم)

کوروش وزیری لحاق*[۱]، علیرضا مجتهدی[۲]
مهدی صنایعی[۳]، سید رضا حسینی[۴]

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۰۶ *نویسنده مسئول تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۲

© نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۸، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

چکیده

انتشار امواج در نواحی ساحلی از مهم‌ترین پدیده‌های مهندسی سواحل است، که پایه و مقدمهٔ بسیاری از مطالعات و فعالیت‌های ساحلی است. اندازه‌گیری میدانی دقیق‌ترین روش برای دست‌یابی به الگوی امواج یک منطقه است، اما هزینهٔ زیاد و زمان‌بر بودن آن، استفاده از مدل‌های ریاضی را ضروری می‌سازد. در حال حاضر، اکثر شبیه‌سازی‌های امواج ساحلی، با استفاده از نرم‌افزارهای خارجی انجام می‌شوند. مدل‌های عددی تجاری و غیرتجاری خارجی موجود، دارای مشکلاتی مانند قیمت بالا و عدم‌امکان اِعمال تغییر متناسب با نیازهای بومی کشور می‌باشند، که استفاده از آنها را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند. بنابراین، داشتن یک مدل بومی معتبر ضروری است. با توجه به این نیاز، نرم‌افزار ایرانی PMODynamics برای شبیه‌سازی پدیده‌های دریایی توسط سازمان بنادر و دریانوردی طراحی شده است. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی قابلیت مدل ایرانی PMODynamics در شبیه‌سازی امواج است. به این منظور ناحیهٔ ساحلی بندر گوردیم واقع در جنوب استان سیستان و بلوچستان به‌عنوان منطقهٔ موردمطالعه انتخاب شد. امواج این ناحیه با استفاده از مدل PMODynamics و مدل شناخته‌شدهٔ MIKE21 SW شبیه سازی و نتایج دو مدل با هم مقایسه شد. درنهایت، نتایج حاصل از مدل PMODynamics با نتایج مدل MIKE21 SW مطابقت قابل‌قبولی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: مدل موج، PMODynamics، MIKE21 SW، مشخصات موج، بندر گوردیم

۱. کارشناسی ارشد سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تبریز، Kourosh.vaziri92@Gmail.Com
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران ـ آب، دانشگاه تبریز، Mojtahedi@Tabrizu.ac.ir
۳. کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، شرکت هندسه پارس، Mehdi.sna@Gmail.Com
۴. دکترای سازه‌های دریایی، شرکت راه‌سازی و عمران ایران، Reza_ho@Yahoo.Com

۱- مقدمه

انتشار امواج در نواحی ساحلی از مهم‌ترین پدیده‌های مهندسی سواحل است، که پایه و مقدمهٔ بسیاری از مطالعات و فعالیت‌های ساحلی است. امواج در تعیین هندسه و شکل سواحل نقش مهمی بر عهده دارند. تعیین شرایط موج در مناطق ساحلی (تعیین ارتفاع ، دورهٔ تناوب و جهت امواج) برای برآورد نیروهای وارده از طرف امواج بر خط ساحلی ضروری است. همچنین میزان تلاطم امواج درون حوضچهٔ بنادر و پیرامون آن، بر ایمنی رفت‌وآمد کشتی‌ها به درون بندر بسیار اثر دارد. به همین دلیل، باید میزان مجاز تلاطم‌های درون بندر و پیرامون آن بر اثر امواج انتقال‌یافته به ناحیهٔ ساحلی بررسی شود (بهادری و همکاران، ۱۳۹۲).

اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق‌ترین روش برای دست‌یابی به الگوی امواج یک منطقه است. اما هنگامی که تعیین این الگوها در منطقه‌ای وسیع مد نظر باشد، روش اندازه‌گیری میدانی به‌تنهایی قادر به پاسخ نخواهد بود. هزینهٔ زیاد و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری‌های میدانی، استفاده از مدل ریاضی را ضروری می‌سازد. امروزه، با بالا رفتن سرعت پردازش رایانه‌ها و رشد روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم بر فیزیک مسئله، معمولاً برای پیش‌بینی خصوصیات پدیده‌های هیدرودینامیکی از شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود (کاظمی و همکاران، ۱۳۸۹).

هدف از انجام این پژوهش، بررسی الگوی امواج منطقهٔ گوردیم به‌منظور ارزیابی قابلیت مدل ایرانی PMODynamics در مقایسه با مدل عددی شناخته‌شدهٔ MIKE 21 است. ازاین‌رو، مدل‌ها پس از تجزیه‌تحلیل حساسیت و واسنجی/ کالیبراسیون پارامترهای مختلف، برای بندر گوردیم اجرا شد، تا نتایج حاصل از این دو مدل مقایسه شوند و نواقص و کاستی‌های نرم‌افزار بومی PMODynamics شناسایی و در مراحل آتیِ توسعه برطرف شوند.

۱-۱- بیان مسئله

امواج در نواحی ساحلی پدیده‌هایی فعال و تعیین‌کننده هستند. انتشار امواج به سوی نوار ساحلی و تأثیر پدیده‌های مربوط به ناحیهٔ شکست امواج بر آنها، در مطالعات مهندسی سواحل و بنادر اهمیت بسیاری دارند. طول امواجی که از نواحی عمیق دریا، به سمت آب‌های کم‌عمق پیشروی می‌کنند، کاهش می‌یابد و ارتفاع آنها افزایش می‌یابد. بنابراین، تیزی آنها افزایش می‌یابد و در عمق معینی می‌شکنند و بعد از آن، تا ساحل انرژی آنها مستهلک می‌شود. شکست موج باعث استهلاک انرژی در قالب اغتشاش و کار انجام‌شده بر اثر اصطکاک بستر دریا می‌شود (چگینی، ۱۳۷۷).

معمولاً اطلاعات موج (ارتفاع، دورهٔ تناوب و جهت امواج) که برای مطالعات و طرح‌های مهندسی مورد نیاز است، در محدودهٔ کم‌عمق ساحلی در دسترس نیست و فقط اطلاعـات پیش‌بینی‌شده یا جمع‌آوری‌شده از نقاط دور از ساحل و آب‌های عمیق یا نقاط مجاور منطقهٔ مـوردنظر و با عمق یکسان قابل‌دسترس هستند. معمولاً برای پیش‌بینی اطلاعات امواج در آب‌های کم‌عمق از مدل‌های عددی استفاده می‌شود. بنابراین، در هنگام پیش‌بینی شرایط امواج در نواحی کم‌عمق ساحلی باید با انجام مطالعات مختلف دقت مدل‌های عددی مورد ارزیابی قرار گیرد. مدل ریاضی ایرانی PMODynamics[5] نیز که توسط سازمان بنادر و دریانوردی تهیه شده است، از این قاعده مستثنی نیست و به‌منظور تکمیل فرایند توسعه، دقت نتایج نیازمند ارزیابی است. در این مطالعه، برای این منظور از اطلاعات ناحیهٔ ساحلی *گوردیم* استفاده شده است.

۱-۲- ضرورت و اهمیت پژوهش

اجرای مدل‌های عددی از بهترین روش‌های پیش‌بینی شرایط آتی هیدرودینامیک حوزه‌های آبی است. اما در حال حاضر، بسیاری از این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای خارجی انجام می‌شوند. مدل‌های تجاری و غیرتجاری خارجی، مشکلات متعددی دارند، که استفاده از آنها را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند. هر یک از این نرم‌افزارها برای هدف خاصی طراحی شده‌اند. درنتیجه، امکان استفاده از آنها در محدودهٔ وسیعی از مطالعات مهندسی وجود ندارد و الزاماً در سواحل و محیط دریایی ایران جواب‌گوی همهٔ نیازهای داخلی نیست. از طرف دیگر، همهٔ نرم‌افزارهای تجاری به شکل یک بستهٔ غیرقابل‌تغییر ارائه می‌شوند و امکان اِعمال تغییر در آنها متناسب با نیاز پروژه‌های بومی وجود ندارد. به‌علاوه، قیمت بسیار بالای این نرم‌افزارها باعث گرایش به استفاده از نسخه‌های قفل‌شکسته می‌شود، که صحت نتایج آنها قابل‌تردید است و در پروژه‌ها و پژوهش‌های بین‌المللی قابل‌استفاده نیستند. بنابراین، داشتن یک مدل بومی معتبر ضروری به نظر می‌رسد. ازاین‌رو، لازم است مدل ریاضی ایرانی PMODynamics در مطالعات مختلف به‌کار گرفته شود و نتایج آن در مقایسه با سایر مدل‌های مطرح در زمینهٔ مهندسی سواحل مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد، تا نواقص و کاستی‌های آن شناسایی شوند و در مراحل بعدیِ توسعه برطرف گردند.

۱-۳- پیشینهٔ پژوهش

در سال‌های اخیر، با پیشرفت پردازنده‌های رایانه‌ای، مدل‌های عددی بسیاری برای شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف ساحلی، ازجمله شبیه‌سازی امواج توسعه

---

5. Persian Model for Ocean Dynamics

یافته‌اند. پژوهشگران بسیاری با استفاده از این مدل‌ها، پدیده‌های ساحلی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. ازآنجاکه در این پژوهش، قابلیت مدل ایرانی PMODynamics ارزیابی می‌شود، تعدادی از جدیدترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه ارائه می‌شوند.

شهریننانی و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی عملکرد مدل ریاضی PMODynamics در شبیه‌سازی امواج ناحیهٔ ساحلی لاور را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که نتایج حاصل از مدل، با برداشت‌های میدانی مطابقت خوبی نشان می‌دهد.

بهلولی و همکاران (۱۳۹۳)، مطالعه‌ای را با هدف اعتبارسنجی مدل PMODynamics در شبیه‌سازی بدنه‌های آبی بزرگ انجام دادند. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و واسنجی و همچنین مقایسهٔ نتایج با اطلاعات میدانی نشان داد که این مدل می‌تواند نتایج قابل‌قبولی ارائه دهد.

بختیاری و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی قابلیت مدل PMODynamics در پیش‌بینی پارامترهای موج خلیج بوشهر پرداختند و نتایج مدل موج PMODynamics را با مدل MIKE 21 SW و داده‌های اندازه‌گیری‌شده مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که نتایج دو مدل از هم‌خوانی بالایی برخوردارند.

۲- روش پژوهش

استفاده از نرم‌افزارها برای حل مسائل مهندسی معمولاً دارای سه مرحله است. اولین مرحله طراحی مدل است، که شامل همهٔ فعالیت‌های موردنیاز پیش از اجرای مدل است. در این مرحله، پس از انجام مطالعات اولیه، داده‌های موردنیاز جمع‌آوری می‌شوند و مسئلهٔ موردنظر به شکل ورودی‌های قابل قبول برای مدل تعریف می‌شوند. دومین مرحله، اجرای مدل است که در آن، محاسبات مورد نظر با توجه به روش‌ها و ضرایب به‌کاررفته، انجام می‌شوند و در مقاطع مکانی و زمانی خاص، از آنها خروجی تهیه می‌شود. به‌کارگیری روش‌های مختلف برای حل معادلات، تجزیه‌تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترهای مختلف برای دست‌یابی به بهترین شبیه‌سازی از شرایط واقعی، در این مرحله صورت می‌گیرد. آخرین مرحله، تحلیل نتایج است که شامل تحلیل و بررسی میزان هم‌خوانی و انطباق نتایج با استفاده از نمودارها و گراف‌ها و پارامترهای آماری است.

شبیه‌سازی در این پژوهش این‌گونه انجام شد. درابتدا، با استفاده از داده‌های میدانیِ موجود، به واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی پرداخته شد، تا اطمینان حاصل شود که نتایج به‌دست‌آمده مطابق با داده‌های میدانی است. سپس، امواج ناحیهٔ ساحلی بندر گوردیم با استفاده از مدل ریاضی شناخته‌شدهٔ MIKE 21 SW و مدل بومی PMODynamics شبیه‌سازی شدند و نتایج دو مدل مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش همهٔ فرایندهای شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای MIKE 21 SW, 2014 و PMODynamics 1.39 انجام شده است.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

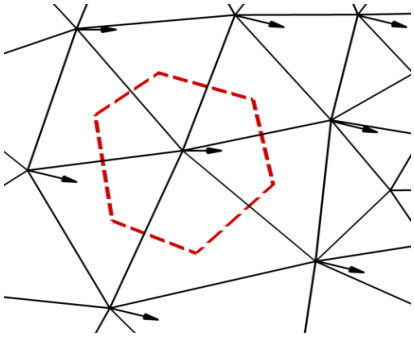
۳-۱- مدل PMODynamics

نرم‌افزار PMODynamics در کاربردهای مختلف مهندسی سواحل از جمله، شبیه‌سازی جریان‌های کِشندی، شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از باد، اِعمال اثر کوریولیس بر جریان، جریان در محیط‌های بسیار بزرگ (اقیانوس‌ها)، شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از موج، شبیه‌سازی تولید و انتشار امواج در محیط‌های بزرگ و کوچک، شبیه‌سازی جریان رسوب ساحلی و ریخت‌شناسی و تجزیه‌تحلیل و استخراج پارامترهای کِشندی قابل‌استفاده است. (www.pmodynamics.pmo.ir).

هر دو مدل PMODynamics و MIKE 21 اساساً با استفاده از معادلات یکسان امواج را پیش‌بینی می‌کنند. با این تفاوت که هر یک از این مدل‌ها در روش‌های استفاده‌شده یا نوع شبکهٔ محاسباتی ویژگی‌های خاصی دارند. در مدل PMODynamics، امکان استفاده از هر دو نوع شبکهٔ منظم و نامنظم در فضای جغرافیایی وجود دارد. در این شبکه‌ها، همهٔ متغیرها در مرکز حجم کنترل در نظر گرفته می‌شوند. شبکهٔ نامنظم استفاده‌شده در این مدل یک شبکهٔ مثلثی است که می‌تواند با روش دلانی[۶] یا روش مثلث‌بندی پیش‌رونده تولید شود. حجم کنترل‌های این شبکه از برخورد عمودمنصف‌های مثلث‌های پدیدآورندهٔ شبکه به وجود می آیند. بنابراین، حجم کنترل‌های مورداستفاده در مدل، چندضلعی‌هایی است که مرکز آنها رئوس مثلث‌های پدیدآورندهٔ شبکه است. این حجم کنترل‌ها با یکدیگر همپوشانی ندارند. به‌علاوه، مرزهای این حجم کنترل‌ها نیز بر اضلاع مثلث‌های پدیدآورندهٔ شبکه عمود هستند. به این ترتیب، می‌توان گفت که در این شبکه برای انجام محاسبات به تولید نقاط محاسباتیِ اضافه نیاز نیست. این شبکه از نوع نقطه‌مرکز است و همهٔ متغیرها و مجهولات مدل در محل رئوس مثلث‌ها قرار گرفته اند. در شکل (۱)، نمایی از شبکهٔ محاسباتی مورداستفاده نمایش داده شده است (*بهلولی و شیرکوند*، ۱۳۹۰). مدل MIKE 21 به‌منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم بر فرایندها، مانند معادلات پیوستگی، مومنتم و انتقال- انتشار از روش حجم محدود میان‌سلولی استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات به روش مش‌های منعطف

6. Delauny

مثلثی، از نوع بی‌ساختار، و با بیشترین تناسب تراکم‌پذیری با دامنهٔ حل انجام می‌شود. برای محاسبهٔ شارهای انتقالی از روش تقریبی Riemann Solver استفاده شده است و برای اجتناب از نوسانات عددی، محدودکننده‌های شیب TVD درجه‌دوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند و برای محاسبهٔ انتگرال زمانی از روش درجه‌دوم Runge-Kutta استفاده شده است (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ MIKE 21 Manual, 2014).



شکل (۱): شبکه نامنظم در مدل PMODynamics
(بهلولی و شیرکوند، ۱۳۹۰)

۳-۲- امواج طیفی

در مطالعات هیدرودینامیک پروژه‌های دریایی، مشخصات اصلی امواج شامل ارتفاع، دورهٔ تناوب، طول موج و غیر آن با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و اطلاعات موجود در ناحیهٔ ژرفابی مشخص می‌شوند. در هنگام ورود امواج از ژرفاب به منطقهٔ نزدیک ساحل پدیده‌هایی مانند ژرفاکاستی، انعکاس، انکسار، تفرق، سفیدک راس و غیر آن باعث تغییر در مشخصات اصلی آنها می‌شود. یکی از جامع‌ترین راه‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی این امواج، بهره‌برداری از نظریهٔ امواج طیفی است، با توجه به اینکه در مدل طیفی، موج به‌صورت غیرمستقیم و با شبیه‌سازی انرژی امواج، به نمایندگی از خود موج، شبیه‌سازی می‌شود، بسیاری از کمیت‌های آماری موج به‌راحتی قابل‌شبیه‌سازی خواهند بود.

از میان مدل‌های عددی مطرح در تحلیل پدیده‌های حاکم بر محیط دریا، مدل ریاضی MIKE 21 یکی از معروف‌ترین آنها است. قابلیت این نرم‌افزار در شبیه سازی‌های متفاوت و نتایج قابل‌استنادی است، که در مقالات و مجامع علمی ارائه شده‌اند. رقم‌های پسوند ۲۱ از چپ به راست کاربرد این سامانه را برای جریان‌های دوبعدی و یک لایه بیان می‌کنند. این سامانهٔ مدل‌سازی، یکی از نرم‌افزارهای حرفه‌ای برای جریان‌های سطحی آزاد است که در آن می‌توان از لایه‌بندی جریان سیال صرف‌نظر کرد.

هدف اصلی مدل موج PMODynamics و MIKE 21 SW حل معادلهٔ عمل موج به‌منظور استخراج چگونگی توزیع مشخصات موج در مختصات جغرافیایی است. این معادله پدیده‌های فیزیکی از قبیل انتشار موج، انکسار موج، خیز موج، ایجاد و رشد موج، افت موج و همچنین اندرکنش غیرخطی موج ـ موج را دربر می گیرد. در این مدل موج طیفی، معادلهٔ حاکم با استفاده از روش Time Splitting گسسته و در چند گام حل می‌شود. در گام نخست، مؤلفه‌های مختلف ترم انتقال به‌صورت صریح و با استفاده از روش‌هایی با دقت بالا حل می‌شوند. سپس، در گام بعد چشمه‌چاه‌ها حل می‌شوند و بسته به اینکه مثبت یا منفی باشند، به ترتیب به‌صورت صریح یا ضمنی در معادله وارد می‌شوند. این روند برای هر دو نوع شبکهٔ منظم و نامنظم اعمال شده است. از این مدل موج طیفی می‌توان برای پیش‌بینی شرایط موج در مقیاس‌های بزرگ (اقیانوسی) یا کوچک (ساحلی) استفاده کرد.

معادلات حاکم در این مدل معادله تعادل عمل موج است، که براساس آنچه کومنو همکاران (۱۹۹۴) و یانگ (۱۹۹۹) ارائه کرده‌اند، در فضای طیفی قابل استفاده است. حالت عمومی این معادله $DN/Dt = S/\sigma$ است، که حالت مبسوط آن در معادلهٔ (۱) مشاهده می‌شود.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx} N}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy} N}{\partial y} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \qquad (۱)$$

در این معادله،

N: چگالی عمل موج،

$\mathbf{x}(x,y)$: مختصات جغرافیایی،

$V(C_{gx}C_{gy}C_{\sigma}C_{\theta})$ مؤلفه‌های سرعتی انتقال یک گروه موج،

$\sigma = 2\pi f = \sqrt{gktanh(kd)}$: بسامد نسبی زاویه‌ای،

θ : جهت انتقال موج و

d: ژرفای آب و k معرف عدد موج است.

در این مدل، مشخصات موج به‌وسیلهٔ انتگرال‌گیری از طیف چگالی عمل موج N که با چگالی انرژی موج E نسبت مستقیم دارد، به دست آمده است. سمت چپ معادلهٔ (۱) مشتق کامل چگالی عمل موج و شامل تغییرات مکانی چگالی عمل موج و تغییرات طیفی چگالی عمل موج است. سمت راست معادلهٔ تعادل دربرگیرندهٔ چشمه‌چاه‌ها است. چشمه‌چاه‌ها پدیده‌هایی فیزیکی هستند که موجب افزایش یا کاهش انرژی سامانه می‌شوند. این چشمه‌چاه‌ها شامل اثر باد، اندرکنش غیرخطی امواج، اصطکاک کف و اتلاف انرژی ناشی از شکست موج در منطقهٔ کم‌عمق یا اتلاف ناشی از چرخک‌های سطحی هستند. توابع S از سه قسمت عمده تشکیل شده‌اند. این سه قسمت عبارتند از S_{in} اثر باد به‌عنوان عامل اصلی ایجاد موج، S_{dx} همهٔ عوامل میراکننده به‌عنوان توابع اتلاف انرژی موج و S_{nl} اندرکنش غیرخطی موج ـ موج (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۳).

در مدل PMODynamics، روش حل 1^{st} order، FROMM و QUICKEST بوده است و روش‌های مورداستفاده در مدل MIKE21، روش تفاضل های محدود و روش ADI بوده است (DHI, 2014).

۳-۳- منطقهٔ مورد مطالعه

در این پژوهش، ناحیهٔ ساحلی گوردیم به‌عنوان منطقهٔ مطالعاتی انتخاب شده است. منقطهٔ ساحلی گوردیم، واقع در جنوب استان سیستان و بلوچستان، جزء سواحل مکران و دارای طول جغرافیایی"۲۹ '۰۶°۶۰ E و عرض جغرافیایی"۲۴ '۲۱°۲۵ N است. بندر گوردیم در فاصلهٔ ۲۱ کیلومتری شرق بندر تنگ و در حدود ۲۲ کیلومتری غرب بندر پزم‌تیاب است (صداقی و همکاران، ۱۳۹۱). شکل (۲) موقعیت بندر گوردیم در دریای عمان را نشان می‌دهد.

شکل (۲): موقعیت بندر گوردیم در دریای عمان

۳-٤- اطلاعات ورودی و طراحی مدل

در این پژوهش، مدل‌سازی شامل انتخاب منطقهٔ مطالعاتی، جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز و تبدیل آنها به فرمت مناسب برای هر مدل و انتخاب یک شبکه‌بندی مناسب است. ساختن ورودی‌های موردنیاز و شبکه‌بندی ناحیه در این پژوهش با استفاده از MIKE Zero, 2014 و PMODynamics 1.39 صورت گرفت.

اجرای مناسب یک پژوهش، به صحت داده‌های جمع‌آوری‌شده وابسته است. بنابراین، جمع‌آوری اطلاعات مناسب و دقیق از اهمیت بسیار برخوردار است. در این پژوهش، از تأثیر باد و کِشند بر هیدرودینامیک و نظام رسوبی منطقه صرف‌نظر شده است و فقط انتقال امواج از ژرفاب به ناحیهٔ کم‌عمق/تُنُکاب و ایجاد جریان ناشی از این امواج در آب کم‌عمق و انتقال رسوب ناشی از موج و جریان ناشی از موج، مورد مطالعه قرار گرفته است. آب‌نگاری منطقه، مشخصات موج در ژرفاب و تنکاب اطلاعات موردنیاز برای طراحی و اجرای مدل هستند. صحت‌سنجی نتایج مدل نیز با اطلاعات مربوط به مشخصات ارتفاع موج در تُنُکاب (آب‌های نزدیک ساحل) انجام شده است.

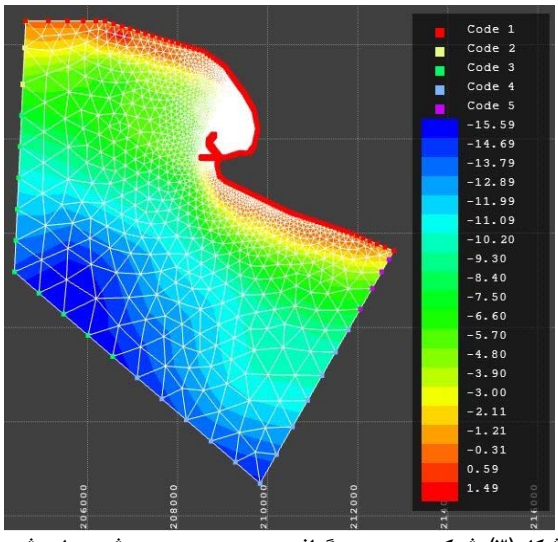
اطلاعات مربوط به ژرفای محدودهٔ موردمطالعه (آب‌نگاری) از مهم‌ترین اطلاعات پایه در این پژوهش محسوب میشود، که علاوه بر کمک به شناخت وضعیت موجود، پایهٔ انجام مدل‌سازی‌های جریان، موج و رسوب است. در ساخت مدل اطلاعات آب‌نگاری محدودهٔ ساحل *گوردیم* که توسط سازمان ملی نقشه‌برداری کشور

تهیه شده، مورد استفاده قرار گرفته است. مقیاس برداشت اطلاعات آب‌نگاری در این محدوده در همهٔ قسمت‌ها برابر با ۱:۵۰۰۰ است.

مشخصات موج موردنیاز برای مدل‌سازی، ارتفاع مشخصه، دورهٔ تناوب بیشینه و متوسط جهت حرکت موج در ژرفاب است که به‌صورت سری زمانی به نرم افزارهای MIKE و PMODynamics معرفی می‌گردد. اطلاعات موج در نقطه‌ای مقابل محدودهٔ بندر گوردیم، مربوط به پروژهٔ ISWM در دسترس می‌باشد. پروژهٔ مدل‌سازی امواج دریاهای ایران توسط سازمان بنادر و دریانوردی تعریف شده و برای یک دورهٔ آماری ۱۱ساله توسط مرکز ملی اقیانوس‌شناسی و مؤسسهٔ هیدرولیک دانمارک در محدودهٔ خلیج‌فارس و دریای عمان انجام شده است. مشخصات امواج در طی این دوره برای نقاطی با فواصل ۰/۱۲۵ درجه برای محدودهٔ آب‌های ایران و با گام زمانی شش‌ساعته تهیه شده است و در اختیار می‌باشد. جهت غالب انتشار امواج در محدودهٔ دریایی مقابل محدودهٔ پروژه ۱۸۰ درجه است. بیشینهٔ ارتفاع مشخصهٔ امواج در این محدوده نزدیک به ۲/۷۱ متر است، که از جهت ۲۶۶ درجه منتشر می‌شود. همچنین، برای صحت‌سنجی مدل‌ها از ارتفاع موج ثبت‌شده توسط بویه‌ای واقع در مقابل بندر گوردیم و داده‌های امواج مدل ECMWF استفاده شده است.

ساخت یک شبکه اولین و مهم‌ترین قسمت یک حل عددی است. عواملی مانند تعداد نقاط شبکه، ریز و درشت بودن شبکه در نقاط مختلف و به‌طور کلی با ساختار یا بدون ساختار بودن آن از ویژگی‌های اصلی یک شبکه است. در این مدل‌سازی باید از شبکهٔ بدون ساختار استفاده شود، تا شکل هندسی ناحیه به خوبی پیاده‌سازی و با داشتن دقت کافی، مدت‌زمان اجرای مدل کمتر شود. در مدل PMODynamics، در فضای مدل امکان ساخت شبکهٔ موردنیاز برای مدل‌سازی فراهم است. این شبکه قابلیت به‌کارگیری در نرم‌افزار MIKE را دارد. ازاین‌رو، در این پژوهش برای شبیه‌سازی هر دو نرم‌افزار از شبکهٔ تولیدشده به‌وسیلهٔ PMODynamics استفاده شده است، تا بتوان نتایج را با شبکه‌بندی یکسان در دو مدل مقایسه کرد.

ابعاد شبکه باید به گونه‌ای باشد که در نزدیکی نوار ساحلی و به‌ویژه داخل حوضچهٔ بنادر، ریزتر باشد، تا بررسی وضعیت موج در آنجا با دقت بیشتری صورت گیرد. میزان ریزی ابعاد شبکه باید مورد تجزیه‌تحلیل حساسیت قرار گیرد، تا ضمن داشتن دقت مطلوب در نتایج، مدت‌زمان اجرای مدل نیز مناسب باشد. شبکهٔ محاسباتی علاوه بر وضعیت سلول‌های محاسباتی، اطلاعات تراز بستر و کدهای مرزی را نیز شامل می‌شود. لازم به ذکر است که قبل از ساختن شبکه، نقاط آب‌نگاری و کدهای مرزی معرفی می‌شوند. پنج مرز به کدهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ برای این شبکه‌ها تعریف شده‌اند. پس از تجزیه‌تحلیل حساسیت بهترین ابعاد شبکه مطابق با شکل (۳) مشخص شد.



شکل (۳): شبکه‌بندی، هیدروگرافی و مرزبندی محدوده شبیه‌سازی‌شده در PMODynamics

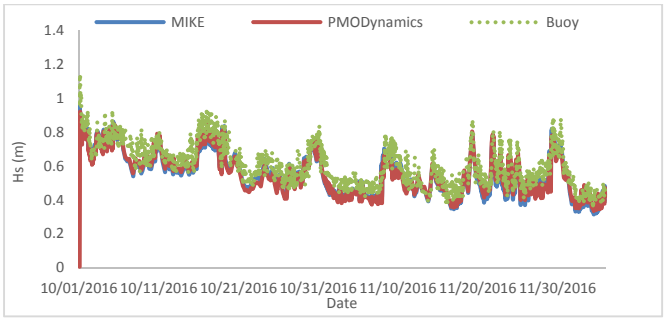
۳-۵- اجرای مدل (تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترها)

شبیه‌سازی انتشار موج از ژرفاب به آب تُنُکاب با استفاده از ماژول SW از نرم‌افزار MIKE 21 و ماژول Wave از نرم‌افزار PMODynamics صورت گرفت. در ابتدای شبیه‌سازی، در هر دو مدل MIKE 21 و PMODynamics، شبکه‌های محاسباتی تهیه‌شده در مرحلهٔ مدل‌سازی به نرم‌افزارها معرفی شد. سپس، مدت‌زمان و گام زمانی اجرای مدل تعیین گردید. با توجه به در اختیار بودن اطلاعات موج ژرفابی برای بازهٔ زمانی ۲۰۰۳/۰۶/۰۱ ۱۲:۰۰:۰۰ تا ۱۲:۰۰:۰۰

۲۰۰۳/۰۷/۰۱، این بازهٔ زمانی ۳۰ روزه برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. گام زمانی در هر دو مدل، ۱۵۰ ثانیه لحاظ شد. همچنین، برای صحت‌سنجی مدل‌های اجراشده در ماژول موج مدل PMODynamics و ماژول SW از مدل MIKE 21 از دادهٔ ارتفاع موج ثبت‌شده توسط بویه‌ای واقع در مقابل بندر گوردیم و داده های امواج مدل گلوبال ECMWF استفاده شد. این بویه، ارتفاع امواج را از تاریخ ۲۰۱۶/۱۰/۰۱ تا ۲۰۱۶/۱۲/۰۶ ثبت کرده است. برای صحت‌سنجی، مدل‌هایی اجرا شدند که در آنها، داده‌های امواج مدل گلوبال ECMWF در محل مرز ژرفاب مدل‌های اجراشده (مرز ۳ و ۴) به‌عنوان ورودی استفاده شد.

به‌دلیل کوچک بودن محدودهٔ مورد مطالعه و به‌تبع آن، کوچک بودن طول بادگیر، از تأثیر باد صرف‌نظر شد. کِشند نیز بر نتایج خروجی تأثیر چندانی نداشت. بنابراین، برای جلوگیری از افزایش مدت‌زمان اجرای مدل، از اِعمال آن صرف‌نظر شد. تنها ورودی به مدل‌ها موج ژرفابی است، که به آب کم‌عمق/تنکاب منتقل می‌شود و پدیده‌های مختلفی بر آن تأثیر می‌گذارد. بنابراین، در این پژوهش به‌منظور دستیابی به نزدیک‌ترین نتایج به شرایط واقعی، تجزیه‌تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترهای شکست موج و اصطکاک بستر[7] انجام شد. Alpha و Gamma پارامترهای شکست موج هستند، که پس از بارها اجرا کردن مدل‌ها با ضرایب مختلف، مشاهده شدند که Alpha=۱ و Gamma=۰/۸ مناسب‌ترین مقادیر هستند. برای اِعمال اصطکاک بستر در هر دو مدل، از زبری نیکورادزه[8] استفاده شد. درنتیجه، بهترین نتایج با Kn=۰/۰۰۰۱ از مدل‌ها استخراج می‌گردد. شرایط مرزی نیز با تعریف کدهای مرزی در هر دو مدل انجام شد. در مرزهایی با کدهای ۳ و ۴ که در ژرفاب قرار دارند، سری زمانی مشخصات موج ژرفابی در مدت شبیه‌سازی که به فرمت مناسب برای مدل‌ها تبدیل شده بود، معرفی شد. مرزهایی با کدهای ۲ و ۵ نیز به‌عنوان دیوار جانبی تعریف شدند. لازم به ذکر است که کدهای ۱ و ۰ در مدل MIKE به‌صورت پیش‌فرض مرز خشک هستند.

با مقایسهٔ ارتفاع امواج خروجی از این مدل‌ها در نقطهٔ استقرار بویه‌ای با داده‌های ثبت‌شده، تطابق خوبی مشاهده شد. این تطابق در نمودار (۱) نشان داده شده است. همچنین، در جدول (۱) این نتایج با استفاده از پارامترهای آماری مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماژول SW و ماژول موج PMODynamics، مشخصات موج تنکابی این منطقه را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند. لازم به ذکر است که علت اصلی کمتر بودن ارتفاع امواج خروجی از مدل‌ها نسبت به داده‌های میدانی ثبت‌شده، عدم اِعمال اثر باد در محدودهٔ موردمطالعه است. همچنین، ممکن است تلاطم‌های ناچیز ناشی از حرکت قایق‌های صیادی و غیره عامل دیگر آن باشد.



نمودار (۱): مقایسه ارتفاع امواج خروجی از مدل‌های MIKE و PMODynamics با ارتفاع امواج برداشت شده از بویه

جدول (۱): مقایسه آماری نتایج ارتفاع مشخصه موج درنرم‌افزار MIKE و PMODynamics با داده‌های میدانی

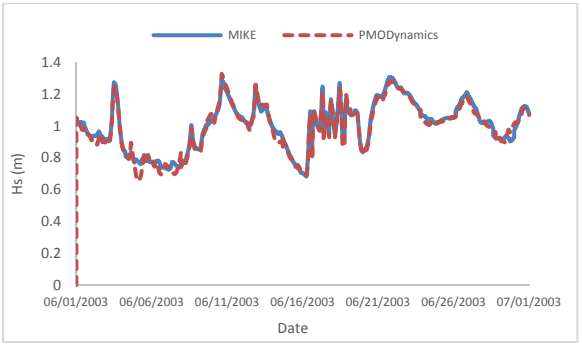
پارامتر آماری	واحد		Hs
CC	–	MIKE-Buoy	۰/۸۱۹۴
		PMODynamics-Buoy	۰/۸۰۲۰
RMSE	متر	MIKE-Buoy	۰/۲۰۱۳
		PMODynamics-Buoy	۰/۲۰۴۴
SI	–	MIKE-Buoy	۰/۲۴۳۹
		PMODynamics-Buoy	۰/۲۴۷۷

پس از صحت‌سنجی مدل‌ها، خروجی‌های ماژول SW از نرم‌افزار MIKE 21 و ماژول موج PMODynamics با شرایط ذکرشده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. تغییرات ارتفاع مشخصه، دورهٔ تناوب بیشینه و جهت متوسط امواج در مدت‌زمان شبیه‌سازی خروجی‌گرفته از ماژول SW نرم‌افزار MIKE و ماژول موج

7. Bottom friction
8. Nikuradse roughness (Kn)

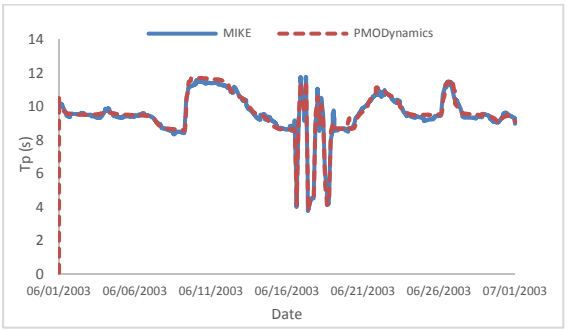
PMODynamics در دو نقطه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. به‌طوری‌که پس از اجرای مدل‌ها در هر دو نرم‌افزار، مشخصات موج شامل ارتفاع مشخصه، دورهٔ تناوب بیشینه و جهت متوسط امواج در مدت شبیه‌سازی (۱۷۲۸۰ گام زمانی ۱۵۰ثانیه‌ای)، در یک نقطه از هر دو مدل خروجی گرفته شد. طول جغرافیایی این نقطه ۲۰۷۹۵۷/۴ و عرض جغرافیایی آن ۲۸۰۹۳۱۰/۲ است و در فاصلهٔ ۸۸۰متری از ساحل قرار دارد و تراز بستر آن ۴/۴۳- است.

از مهم‌ترین خروجی‌های مدل موج طیفی، ارتفاع مشخصه است. همان‌طور که در نمودار (۲) مشاهده می‌شود، نتایج ماژول موج PMODynamics و ماژول SW نرم‌افزار MIKE 21 دربارهٔ ارتفاع مشخصهٔ موج تقریباً بر هم منطبق هستند.



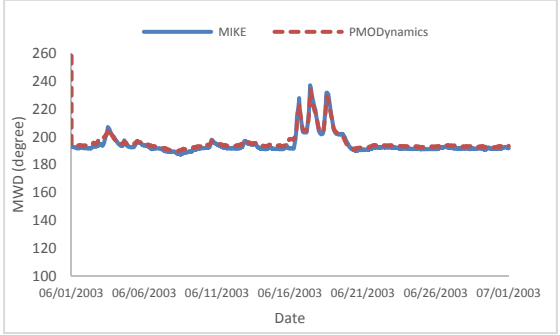
نمودار (۲): مقایسه نتایج ارتفاع مشخصه امواج دو مدل

خروجی مهم دیگر مدل موج طیفی، دورهٔ تناوب بیشینهٔ امواج است. همان‌طور که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود، نتایج ماژول موج نرم‌افزار PMODynamics و ماژول SW از نرم‌افزار MIKE 21 دربارهٔ دورهٔ تناوب بیشینهٔ امواج تقریباً بر هم منطبق هستند.



نمودار (۳): مقایسه نتایج پریود حداکثر امواج دو مدل

جهت متوسط امواج، خروجیِ دیگر مدل موج طیفی است که مورد بررسی قرار گرفت، همان‌طور که در نمودار (۴) مشاهده می‌شود، نتایج ماژول موج PMODynamics و ماژول SW نرم‌افزار MIKE 21 دربارهٔ جهت متوسط موج تقریباً بر هم منطبق هستند.



نمودار (٤): مقایسه نتایج جهت متوسط امواج دو مدل

جدول (۲) مقایسهٔ نتایج مدل‌ها را به‌صورت کلی دربارهٔ ارتفاع مشخصهٔ موج، دورهٔ تناوب بیشینه و جهت متوسط امواج نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می شود، نتایج دو مدل از تطابق خوبی برخوردار هستند.

جدول (۲): مقایسه آماری نتایج حاصل از مدل موج در دو نرم‌افزار

پارامتر آماری	واحد	Hs	Tp	MWD
CC	-	۰/۹۹۷۸	۰/۹۹۷۹	۰/۹۸۱۱
RMSE	درجه ـ ثانیه ـ متر	۰/۰۲۲۳	۰/۰۳۷۶	۰/۰۶۹۱
SI	-	۰/۰۲۵۰	۰/۰۱۳۴	۰/۰۲۹۱

٤- نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان دادند که مدل موج PMODynamics و مدل MIKE 21 SW می‌توانند به خوبی ارتفاع امواج را در آب‌های کم‌عمق شبیه‌سازی کنند. همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارتفاع امواج در آب کم‌عمق در دو مدل تقریباً بر هم منطبق و مشابه هستند. نتایج مدل موج PMODynamics و MIKE 21 SW مربوط به دورهٔ تناوب بیشینه و جهت متوسط امواج نیز تطابق خوبی را نشان دادند. بنابراین، مدل ایرانی PMODynamics قادر است دربارهٔ مشخصات امواج در آب‌های کم‌عمق، نتایجی مشابه با مدل رایج و شناخته‌شدهٔ MIKE 21 SW ارائه کند.

مراجع

۱. بختیاری، آرش؛ کمیجانی، فرشته؛ الهیار، محمدرضا؛ توکلی، محمود. (۱۳۹۲). بررسی مدل ایرانی PMODynamics در خلیج بوشهر، خلیج‌فارس. نشریهٔ اقیانوس‌شناسی، سال چهارم، ش ۱۴، ۱۸-۱۳.

۲. بهادری، حمیدرضا؛ ذونعمت کرمانی، محمد؛ وطنی اسکویی، اصغر. (۱۳۹۲). بررسی عددی نوسانات تراز سطح آب درون حوضچه و پیرامون بندر فریدونکنار بر اثر امواج ساحلی. کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعهٔ پایدار شهری، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

۳. بهلولی، اصغر؛ شیرکوند، علی. (۱۳۹۰). مونیتورینگ و مطالعات بخش‌هایی از سواحل استان‌های سیستان و بلوچستان و بوشهر: مدل PMODynamics (گزارش نظریهٔ مدل جریان در شبکهٔ بی‌ساختار). ادارهٔ کل مهندسی سواحل و بنادر. تهران.

۴. بهلولی، اصغر؛ منتظری نمین، مسعود؛ طاهری، امیرعباس. (۱۳۹۳). شبیه‌سازی الگوی جریان‌های ناشی از باد در دریای خزر با استفاده از مدل PMODynamics. یازدهمین همایش سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی.

۵. جعفرزاده، الهام؛ ایوب‌زاده، سیدعلی؛ منتظری نمین، مسعود؛ بهلولی، اصغر. (۱۳۹۳). شبیه‌سازی انتقال رسوب پشت موج‌شکن بندر انزلی با هدف مقایسهٔ نرم‌افزار ایرانی PMODynamics و MIKE 21. نشریهٔ مهندسی دریا، ۲۰، ۳۹-۴۹.

۶. چگینی، وحید. (۱۳۷۷). نظریه‌های موج، مجموعه‌کتاب‌های مهندسی دریا، شمارهٔ ۱، شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری روش‌های تحقیق در علوم اجتماعی.

۷. شهرینانی، علی؛ منتظری نمین، مسعود؛ بهلولی، اصغر. (۱۳۹۲). ارزیابی عملکرد مدل PMODynamics در مدل‌سازی امواج. کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعهٔ پایدار شهری، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

۸. صداقی، معصومه؛ شیوافر، ایمان؛ شفیعی‌فر، مهدی. (۱۳۹۱). گزارش مطالعات و طراحی مراحل اول و دوم موج‌شکن بندر گوردیم (شرکت هندسهٔ پارس). تهران.

۹. کاظمی، محمدعامر؛ حکیم‌زاده، حبیب؛ ناهید، شهرزاد. (۱۳۸۹). بررسی عددی جریان‌های ناشی از موج در بندر امیرآباد. پنجمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

۱۰. ادارهٔ کل مهندسی سواحل و بنادر. نرم‌افزار PMODynamics. [online] .https://www.pmodynamics.pmo.ir.

11. Manual of MIKE 21. 2014. Coastal Hydraulic and Oceanography Hydrodynamic Module, Danish Hydraulic Institute (DHI Software).