

مدلسازی امواج ناشی از طوفان دی ماه ۹۸ در دریای خزر به منظور بررسی دلایل تخریب موضعی موج شکن غربی بندر کاسپین

علی اصغر گلشانی^{۱*}، سیدمیثم رضایی^۲

۱- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز، پست الکترونیکی: ali.golshani@iauctb.ac.ir
۲- کارشناس ارشد مهندسی سواحل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیکی: meysam.rezaee@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۵

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۸

چکیده

بنابر گزارش‌های ثبت شده و مشاهدات میدانی، طوفان شدیدی در روزهای منتهی به دی‌ماه سال ۱۳۹۷ در دریای خزر حادث گردید که منجر به تخریب بخش‌هایی از موج‌شکن‌های در حال احداث مجتمع بندری کاسپین شده است. این تحقیق در پی تعیین علل خرابی‌های مذکور، ابتدا به جمع‌آوری داده‌های مربوط به مدلسازی‌های پیش‌بینی امواج دریای خزر که در قالب پروژه‌های ملی مختلف پیش از این صورت گرفته است نموده، و سپس به بررسی، مقایسه و تحلیل جامع مدل‌های مذکور پرداخته است. در نهایت با تکیه بر مطالعات قبلی و ضمن اصلاح کاستی‌های مرتبط با آن‌ها، با استفاده از مدل محلی انتشار امواج (SW) اقدام به مدلسازی عددی این طوفان شده است. نتایج این مدلسازی حاکی از دست پایین بودن نتایج مدل پیش‌بینی سازمان بنادر در رابطه با ارتفاع بیشینه موج برابر با ۹ متر نسبت به ۱۱ متر محاسبه شده در این تحقیق می‌باشد. از جمله دلایل این مسئله، افزایش باد WRF در حوالی بندر انزلی که در نتیجه مقایسه با داده‌های باد ایستگاه هواشناسی انزلی انجام شده است؛ تفکیک مکانی بهتر (۰/۰۱ درجه) مدل موج استفاده شده در این تحقیق نسبت به تفکیک مکانی ۰/۱ درجه مدل موج WaveWatch در پیش‌بینی سازمان بنادر و همچنین استفاده از فایل عمق نگاشت دقیق‌تر در مدلسازی این تحقیق می‌باشد. اما با این حال ارتفاع موج در طوفان مذکور از میزان مورد طراحی تجاوز ننموده و در نتیجه روگذری امواج و عدم تکمیل اجرای پوشش نهایی مقاطع در هنگام طوفان علت خرابی موضعی بخش‌هایی از آن بوده است.

کلمات کلیدی: موج‌شکن، طوفان، خزر، بندر کاسپین، مدلسازی عددی.

۱. مقدمه

این مناطق امری ضروری است (Sharifipoor et al., 2005). توجه به این مخاطرات محیطی در توسعه‌ی مناطق ساحلی، موضوع بسیار مهمی است که عدم توجه به آن، سبب می‌شود تا مناطق ساحلی که دارای ظرفیت‌های زیادی در زمینه‌های مختلف هستند، از مناطق دارای فرصت به مناطق دارای تهدید (جانی و مالی) تبدیل شوند (Majdi et al., 2008).

مناطق ساحلی همواره در معرض آسیب‌های ناشی از مخاطرات محیطی به ویژه مخاطرات ناشی از فرآیندهای جریانی باد و آب قرار دارند. جهت کاهش میزان خسارت ناشی از این مخاطرات، شناسایی عوامل به‌وجودآورنده و شناخت انواع آن‌ها در تدوین خط مشی‌های صحیح و برنامه ریزی‌های اصولی در

۱۰	پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی (۱۳۸۴)	پروژه ISW2M	استفاده از باد اصلاح شده ECMWF در مدل موج طیفی SWAN در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۱ میلادی
۱۱	سازمان بنادر و دریانوردی (پایگاه پیش بینی امواج دریاهای ایران)	پایگاه اینترنتی	استفاده از باد ورودی WRF و مدل موج WaveWatch با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه
۱۲	سازمان بنادر و دریانوردی (پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور)	پروژه مانیتورینگ شمال	استفاده از میدان باد WRF در مدل MIKE21-SW

بر اساس مشاهدات عینی و اعلام اداره کل هواشناسی استان گیلان طی روزهای ۲۷ و ۲۸ دی ماه ۱۳۹۷ طوفانی شدید در دریای خزر و در محدوده مجتمع بندری کاسپین به وقوع پیوست. مطابق آمار پایگاه اینترنتی پیش‌بینی امواج سازمان بنادر و دریانوردی (ردیف ۱۱ از جدول ۱)، این طوفان موجب ایجاد امواجی با ارتفاع بیشینه ۸/۹ متر در نقطه‌ای به عمق ۳۰۰ متر و با موقعیت ۳۷/۶ شمالی و ۴۹/۶ شرقی در فاصله ۱۷ کیلومتری بندر انزلی گردیده است (IWFD, 2019). به دلیل شدت بالای طوفان، خساراتی به مقاطعی از موج شکن غربی این بندر وارد آمد. همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است در اثر این طوفان به بخش‌های اصلی موج شکن این بندر همچون تمامی بخش‌های بازوی اصلی (بازوی شرقی) و بخش‌های عمده بازوی فرعی (شاخه غربی)، هیچ‌گونه آسیبی وارد نگردید. برای نخستین بار، پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های میدانی ثبت شده از طوفان مذکور و همچنین با ارزیابی مدل‌ها و اطلاعات پایه موجود مرتبط با این منطقه (خلاصه شده در جدول ۱)، به مدل‌سازی عددی طوفان اخیر پرداخته تا با دستیابی به مقدار موج عامل تخریب موضعی موج شکن، ضمن مقایسه با موج مورد استفاده در طراحی، بتوان به علت تخریب پی برد.



شکل ۱: بخش‌های آسیب دیده موج شکن بازوی غربی در حال اجرا در مقایسه با بازوی اصلی تماماً اجرا شده و آسیب ندیده بندر.

طول خط ساحل در نوار جنوبی دریای خزر واقع در کشور ایران ۸۹۶ کیلومتر بوده که در مجموع تعداد سه استان از استان‌های شمالی کشور، دربرگیرنده این نوار ساحلی با تاسیسات بندری مهم و قابل توجه از لحاظ تعداد و از لحاظ کارکرد اقتصادی هستند. بیش از ۷۶۰۰ کیلومترمربع از استان‌های اشاره شده در محدوده ساحلی قرار دارند. بر اساس تقسیم بندی مناطق ساحلی، ۵۸۳ کیلومتر مربع در پهنه نوسان آب، ۴۹۵ کیلومترمربع در پهنه خطر و ۶۶۰۸ کیلومترمربع در پهنه کاربری ساحلی قرار گرفته‌اند (PMO, 2014). بنابراین نقش مطالعاتی با هدف کاهش صدمات تحمیل شده مالی و جانی ناشی از مخاطرات طبیعی در این منطقه انکار ناپذیر خواهد بود. در جدول شماره ۱، به طور خلاصه ابتدا مقالات و سپس پروژه‌هایی که متولی آن سازمان بنادر و دریانوردی بوده و در آن نسبت به مدل‌سازی امواج دریای خزر اقدام شده است، ارائه گردیده‌اند.

جدول ۱: پیشینه اقدامات صورت گرفته در راستای مدل‌سازی امواج دریای خزر

ردیف	نویسنده(گان) / سازمان	نوع ارائه	شرح
۱	لایقی و زاهدی (۲۰۱۸)	مقاله	استفاده از میدان باد WRF در مدل MIKE21-SW برای مطالعه مناطق امیر آباد، کاشهر و نوشهر
۲	فنجوی و همکاران (۲۰۱۵)	مقاله	استفاده از داده‌های پروژه مدل‌سازی امواج دریای ایران در اطراف ناحیه انزلی جهت مقایسه عملکرد مدل‌های MIKE21-SW و PMODynamics
۳	جعفری و همکاران (۲۰۱۲)	مقاله	استفاده از میدان باد ماهواره‌ای QuikSCAT و مدل‌سازی با مدل SWAN و در نهایت مقایسه خروجی‌ها با ارتفاع امواج محاسبه شده از ماهواره‌های GFO-1 و Topex
۴	طالقانی و گلشنی (۲۰۱۱)	مقاله	استفاده از داده بویه‌های نکا و امیرآباد و محاسبه مشخصات موج با استفاده از روش‌های نیمه تجربی SMB, SPM, CEM, JONSWAP و مدل عددی MIKE21-SW
۵	زمانی و عظیمیان (۲۰۰۸)	مقاله	استفاده از روش شبکه‌های عصبی و داده‌های بویه-های موج‌نگار در مناطق کم عمق و آب عمیق. در این مدل از طریق یک تابع غیرخطی ارتباط بین فضای میدان باد و میدان موج برقرار شده است.
۶	گلشنی و همکاران (۲۰۰۷)	مقاله	استفاده از داده‌های باد مدل ECMWF در مدل عددی MIKE21-SW و انتخاب بهترین تابع قابل برآزش به داده‌ای حدی با استفاده از نرم افزار آماری EVA
۷	فلاح و همکاران (۲۰۰۶)	مقاله	استفاده از اطلاعات باد ایستگاه انزلی در دو مدل MIKE21-SW و WAM به منظور مقایسه کارایی این دو مدل در شبیه سازی امواج
۸	سیادت موسوی و همکاران (۲۰۰۶)	مقاله	استفاده از داده بویه‌های نکا و انزلی در مدل-های MIKE21-SW و WaveWatchIII به منظور مقایسه نتایج آن‌ها در تعیین مشخصات موج
۹	سازمان بنادر و دریانوردی (توسط پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی)	پروژه ISW2M	استفاده از باد اصلاح شده Modified ECMWF در مدل Operational MIKE21-SW در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۳ میلادی

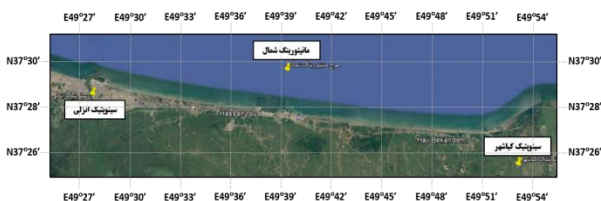
۲. محدوده مورد مطالعه

عنوان پایش و شبیه سازی سواحل ایران نموده است که به عنوان مهمترین منبع اطلاعات پایه سواحل، از جمله موج و باد، مورد استفاده مهندسان مشاور قرار می‌گیرد. اطلاعات پایه و مقادیر حدی ارتفاع امواج (H_s)، که از نتایج مطالعات پایش و شبیه سازی سواحل شمالی کشور استخراج شده، در جدول ۲ ارائه شده است. در محاسبات تحلیل حدی این جدول از روش ماکزیمم‌های سالیانه، (AMS)، و توزیع ویبول استفاده شده است.

جدول ۲: مقادیر حدی استخراج شده از داده‌های بویه انزلی و مقادیر متناظر آن از داده‌های مدل در عمق ۲۵ متری (PMO, 2015).

دوره بازگشت	تحلیل حدی بر اساس ۷ سال داده‌های بویه انزلی (متر)	تحلیل حدی بر اساس ۳۱ سال داده‌های مدل در محدوده انزلی (متر)
۱۰۰ ساله	۴/۷۷	۴/۸۱
۵۰ ساله	۴/۵۷	۴/۵۸
۲۰ ساله	۴/۳	۴/۲۷
۱۰ ساله	۴/۰۹	۴/۰۴
۵ ساله	۲/۸۸	۳/۷۸

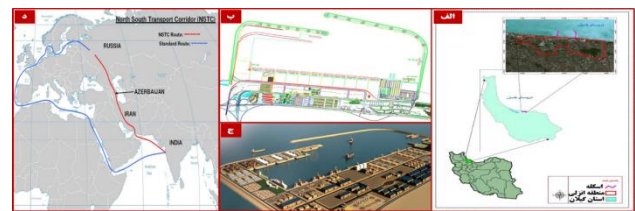
همانگونه که در جدول ۲ قابل مشاهده است، بر اساس مطالعات صورت گرفته از سوی سازمان بنادر و دریانوردی، حداکثر ارتفاع موج طراحی با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در عمق ۲۵ متری بندر انزلی که در مجاورت پروژه کاسپین می‌باشد، برابر ۴/۸۱ متر می‌باشد. از طرفی با دریافت سری زمانی ۳۰ ساله اطلاعات امواج از خروجی مدل پایش شمال (ردیف ۱۲ در جدول ۱) در نقطه‌ای نزدیک به بندر کاسپین (در فاصله حدود ۳/۵ کیلومتری و به مختصات ۴۹/۶۵۸۱ شرقی و ۳۷/۴۸۹۶ شمالی و عمق ۲۲/۵ متر) که محل آن در شکل ۳ نشان داده شده است، ملاحظه شد که در دوره ۳۰ ساله مدلسازی، بیشترین ارتفاع موج مشخصه محاسباتی ۵/۵ متر می‌باشد که در نوامبر ۱۹۹۳ رخ داده است. این بدان معنی است که ارتفاع موج با دوره بازگشت ۳۰ ساله در این نقطه ۵/۵ متر می‌باشد، لذا مقادیر جدول ۲ به نظر می‌رسد که نادرست بوده و دلیل آن می‌تواند انتخاب روش ماکزیمم‌های سالیانه، (AMS)، بجای روش متداول تر ماکزیمم‌های جزئی، (PDS)، باشد که منجر به مقادیر دست پایین شده است.



شکل ۳: موقعیت نقاط اطلاعات موج پروژه پایش (مانیتورینگ) شمال و ایستگاه‌های هواشناسی انزلی و کباشهر

مجتمع بندری کاسپین با هدف بسط ظرفیت‌های ترانزیتی کشور و پشتیبانی از فعالیت‌های حفاری، انتقال و پردازش ذخایر نفت و گاز در دریای خزر، پشتیبانی از فعالیت‌های کشتی سازی و تعمیراتی، توسعه گردشگری دریایی و ایجاد اشتغال بالغ بر ۳ هزار شغل مستقیم و ۹ هزار شغل غیر مستقیم در مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۸ دقیقه و ۴۹ ثانیه طول شرقی و ۴۹ درجه و ۲۷ دقیقه و ۳۷ ثانیه عرض شمالی در منطقه آزاد انزلی ایجاد گردید (GOEAF, 2017; Abedinzadeh et al., 2015).

این بندر با مساحت پسرکانه عملیاتی و پشتیبانی ۳۵۰ هکتار از ۲۲ پست اسکله به ظرفیت سالیانه ۱۵ میلیون تن در یک نوبت‌کاری و دو موج شکن به طول ۶/۲ کیلومتر و مساحت حوضچه ۲۰۰ هکتار می‌باشد که قابلیت پهلوگیری کشتی‌های با آب‌خور ۵/۷ متر و ظرفیت ۱۲ هزار تن کالا تجاری و ۲۰ هزار تن کالای نفتی را دارد. از مهم‌ترین مزایای این بندر نداشتن محدودیت برای توسعه پسرکانه، دارا بودن ترمینال‌های نفتی، فله خشک، رو-رو، راه آهن و کانینری، به همراه ایجاد مرکز تعمیرات و پشتیبانی برای کشتی‌های داخلی و خارجی می‌باشد. این بندر در مسیر کریدور شمال- جنوب قرار گرفته است. این کریدور ارتباط ترانزیتی کشورهای شمال اروپا و روسیه از طریق ایران و دریای خزر به کشورهای حوزه اقیانوس هند، خلیج فارس و جنوب آسیا را برقرار می‌سازد. موقعیت و تصاویر بندر کاسپین در شکل ۲ نشان داده شده است (CPCW, 2019).



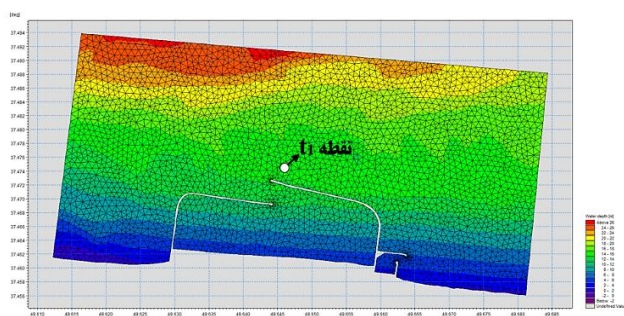
شکل ۲: (الف): موقعیت بندر (Abedinzadeh et al., 2015)، (ب): پلان بندر، (ج): تصویر سه بعدی بندر، (د): مقایسه محور ترانزیت شمال- جنوب (قرمز) با محور ترانزیت قدیم (آبی) (CPCW, 2019).

۳. بدنه تحقیق

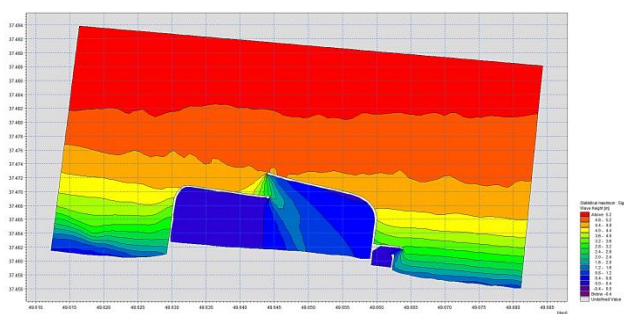
۳-۱- ارزیابی مدل‌ها و داده‌های پایه

سازمان بنادر و دریانوردی طی سال‌های اخیر و به دلیل فقدان داده‌های پایه مناسب، اقدام به اجرای طرح‌های مطالعاتی تحت

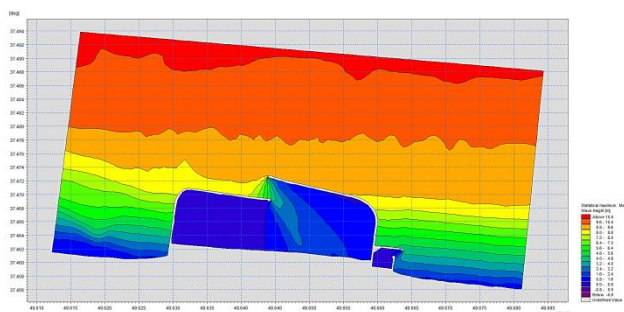
از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۳ (مستخرج از پروژه پایش شمال در نزدیکترین نقطه به بندر کاسپین که در عمق تقریبی ۲۲/۵ متری قرار دارد)، در مرز شمالی به روش فرمول بندی پارامتری غیرکوپله جهتی که بسیار سریع است، اجرا و نتایج سری زمانی ۳۰ ساله موج مدل انتشار در عمق ۱۴/۵ متری استخراج شد. شبکه مورد استفاده و مکان نقطه استخراج، (t_1)، در شکل ۵ نمایش داده شده است. نقشه ارتفاع موج مشخصه و ارتفاع موج بیشینه در طی ۳۰ سال نیز در اشکال ۵ و ۶ ارائه گردیده‌اند.



شکل ۵: شبکه مورد استفاده در مدل‌سازی ۳۰ ساله امواج بندر کاسپین و محل نقطه t_1



شکل ۶: نقشه مقادیر حداکثر ارتفاع موج مشخصه حاصل از اجرای مدل امواج



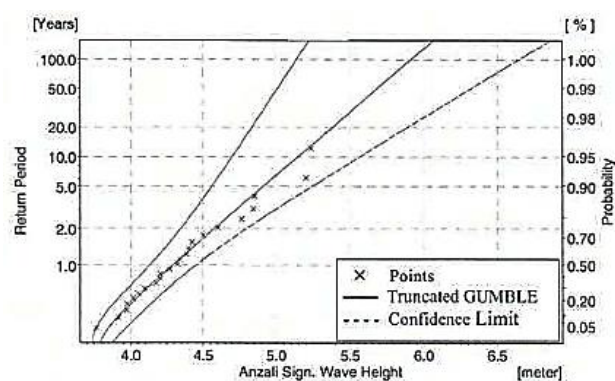
شکل ۷: نقشه مقادیر حداکثر ارتفاع موج بیشینه حاصل از اجرای مدل امواج

سپس تحلیل حدی بر روی نتایج ۳۰ ساله به روش ماکزیمم‌های جزئی و با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۵ متر انجام

اما در پروژه دیگر سازمان بنادر و دریانوردی با نام پروژه مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران (ردیف ۹ از جدول ۱)، ISWM، که بازه زمانی ۱۲ ساله ۱۹۹۲ تا آگوست ۲۰۰۳ را پوشش می‌دهد، با استفاده از روش ماکزیمم جزئی، (PDS)، و در نظر گرفتن تعداد رویدادهای ثابت برابر با دو، $\lambda=2$ ، و توزیع گامبل قطع شده که بهترین تطابق و کمترین انحراف معیار را دارا بوده است، موج در بندر انزلی با دوره بازگشت ۳۰ ساله ۵/۵ متر و دوره بازگشت ۵۰ ساله ۵/۶۸ متر محاسبه شده است (جدول ۳ و شکل ۴). لازم بذکر است که محاسبه مشخصات موج با دوره بازگشت بیش از ۵۰ سال بدلیل کوتاه بودن دوره مدل‌سازی در آن پروژه امکان پذیر نبوده است (حداکثر دوره بازگشت قابل محاسبه سه برابر طول دوره مدل‌سازی است). ضمناً سفارش شده تا محدوده اطمینان نیز دو برابر انحراف معیار، ($\pm 2SD$)، در نظر گرفته شود. این آمار نیز نشان دهنده دست پایین بودن مقادیر جدول ۲ می‌باشد (Golshani et al, 2007).

جدول ۳: نتایج تحلیل حدی با استفاده از توزیع گامبل قطع شده در بویه های انزلی، امیرآباد و نکا بر اساس نتایج پروژه ISWM (Golshani et al, 2007)

نکا	انزلی	امیرآباد	
۵/۰۰	۵/۳۷	۳/۲۹	Hs ۲۰ ساله (متر)
۵/۱۹	۵/۵۱	۳/۳۶	Hs ۳۰ ساله (متر)
۵/۴۳	۵/۶۸	۳/۴۴	Hs ۵۰ ساله (متر)
۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۳	CC

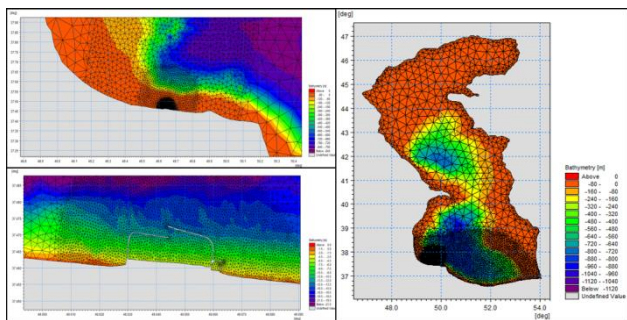


شکل ۴: تحلیل حدی امواج در محل بویه انزلی بر اساس نتایج پروژه ISWM (Golshani et al, 2007)

با توجه به دست پایین بودن مقادیر تحلیل حدی طرح پایش و شبیه سازی سواحل ایران و همچنین کوتاه بودن دوره مدل‌سازی (۱۲ سال) در پروژه مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران برای دوره بازگشت‌های بیش از ۵۰ سال، در این تحقیق مدل محلی انتشار امواج، SW، با اعمال شرایط مرزی ۳۰ ساله پارامتری موج ساعتی

- نقشه آبنگاری محلی بندر کاسپین با مقیاس ۱:۵۰۰۰ برداشت شده در سال ۱۳۹۲.

محدوده مدلسازی و نحوه شبکه‌بندی در شکل ۹ ارائه شده است. شبکه نامنظم ساخته شده برای این مدل شامل ۹۱۵۰ گره و ۱۷۴۴۴ عضو بوده و ابعاد عضوها تا حدود ۱۰۰ متر در حوالی بندر کاسپین ریز شده است.



شکل ۹: (راست): شبکه بندی دریای خزر، (چپ، بالا): شبکه بندی سواحل استان گیلان، (چپ، پایین): شبکه بندی بندر کاسپین که تا حدود ۱۰۰ متر ریز شده است.

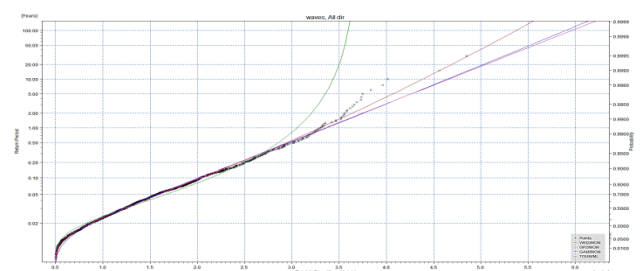
در رابطه با شرایط مرزی باد نیز به دلیل اینکه مدل موج در نظر گرفته شده در این مطالعه، کل دریای خزر را پوشش داده و همچنین با توجه به عدم وجود مرز باز در مدل، تنها شرط مرزی مورد استفاده، میدان بادی می‌باشد که کل دریای خزر را پوشش دهد. داده‌های باد موجود در زمان اجرای مدلسازی امواج، داده‌های باد نقطه‌ای هواشناسی انزلی و کیشهر و همچنین داده‌های میدان باد دوبعدی مدل جهانی NCEP-FNL با تفکیک ۱ درجه در ۱ درجه که کل دریای خزر را پوشش می‌دهد، هستند (RDA, 2019). این میدان باد به دلیل اینکه شبکه محاسباتی درستی دارد، در نزدیکی مرزهای خشکی خصوصاً جنوب دریای خزر که با کوه پوشیده شده است، میدان باد را دست پایین ارایه می‌دهد، لذا نمی‌تواند مستقیماً در مدلسازی امواج مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین میدان باد FNL به عنوان شرایط مرزی مدل جوی WRF دریای خزر با شبکه محاسباتی ۰/۱ درجه مورد استفاده قرار گرفته (WRF, 2019) و نتایج خروجی اجرای این مدل جوی دریای خزر با گام زمانی نیم ساعته، به عنوان ورودی مدل موج در نظر گرفته شد.

داده‌های باد هواشناسی به دلیل اینکه کل دریا را پوشش نمی‌دهند، صرفاً به منظور اصلاح میدان باد خروجی مدل WRF مورد استفاده قرار گرفته که نتایج مقایسه‌ی جهت و سرعت باد

شد. مشخصات امواج طراحی با دوره بازگشت‌های مختلف در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴: مقادیر حدی ارتفاع امواج در نقطه ای به عمق ۱۵ متر در بندر کاسپین برای دوره بازگشت‌های مختلف با اعمال آمار امواج پروژه پایش شمال کشور به عنوان شرایط مرزی مدل موج

دوره بازگشت (سال)	ارتفاع موج (متر)	انحراف استاندارد (متر)	ارتفاع موج + دو برابر انحراف استاندارد (متر)
۵	۴/۰۲	-/۰۹	۴/۲
۱۰	۴/۳۶	-/۱	۴/۶۵
۲۰	۴/۶۸	-/۱۲	۴/۹۲
۵۰	۵/۰۸	-/۱۴	۵/۳۶
۱۰۰	۵/۳۷	-/۱۵	۵/۶۸



شکل ۸: تحلیل حدی بر روی ارتفاع موج مشخصه در نقطه t_1 با استفاده از توزیع‌های مختلف

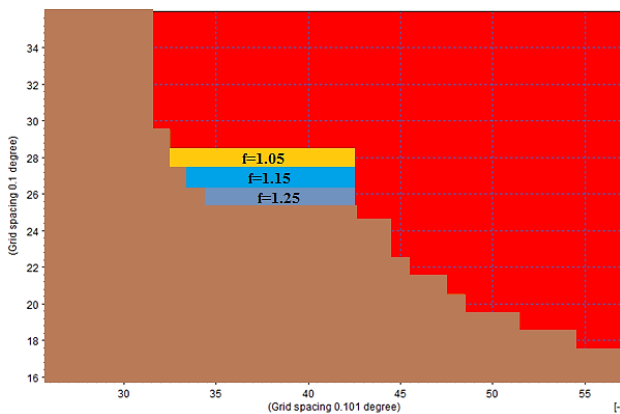
با توجه به شکل ۸ و بر اساس انتخاب توزیع ویبول که بهترین تطبیق با داده‌ها را دارد، موج ۱۰۰ ساله برابر با ۵/۳۷ متر و انحراف معیار ۰/۱۵ متر به دست آمد که با اضافه کردن محدوده اطمینان برابر با دو برابر انحراف معیار، به ۵/۶۸ متر افزایش می‌یابد. در طراحی موج شکن‌ها با استفاده از داده‌های امواج ISWM که دوره ۱۱ ساله را پوشش می‌دهد، عدد ۵/۰۸ متر (البته بدون در نظر گرفتن حاشیه اطمینان) به عنوان موج ۱۰۰ ساله در نظر گرفته شده بود که ۶۰ سانتیمتر کمتر از مقدار بدست آمده در صورت استفاده از داده‌های امواج پروژه پایش شمال می‌باشد.

۲-۳ آمادگی داده‌های ورودی

نقشه‌های آبنگاری گوناگونی با مقیاس‌ها و دقت‌های مختلف برای مدلسازی دریای خزر با تاکید بر منطقه بندر کاسپین موجود است. نقشه‌های آبنگاری که در تهیه فایل عمق نگاشت مدل امواج بندر کاسپین مورد استفاده قرار گرفتند، عبارتند از:

- آبنگاری Mike-C Map level C برای کل دریای خزر
- نقشه‌های مختلف آبنگاری سواحل جنوبی دریای خزر از سازمان نقشه برداری با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰

لازم به ذکر است که داده‌های باد ایستگاه‌های هواشناسی قبل از مقایسه با باد WRF باید به باد در تراز ۱۰ متری سطح دریا تبدیل شده و ضریب تصحیح خشکی به دریا نیز در آن اعمال گردد که این دو ضریب تقریباً همدیگر را خنثی می‌نمایند. نتایج مقایسه، نشانگر دست پایین بودن سرعت باد مدل در مقایسه با سرعت باد ثبت شده توسط ایستگاه انزلی بود، لذا باد WRF در منطقه کیشهر یعنی ۵۰/۲ شرقی تا نقطه انتهایی غرب دریای خزر و تا ارتفاع ۳۷/۸ شمالی، با اعمال ضریب‌های محلی ۱/۲۵، ۱/۱۵ و ۱/۰۵ اصلاح گردید (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: اصلاح باد خروجی مدل جوی WRF با اعمال ضرایب محلی مختلف در جنوب غربی دریای خزر که در نتیجه مقایسه با باد ایستگاه هواشناسی انزلی بدست آمده است.

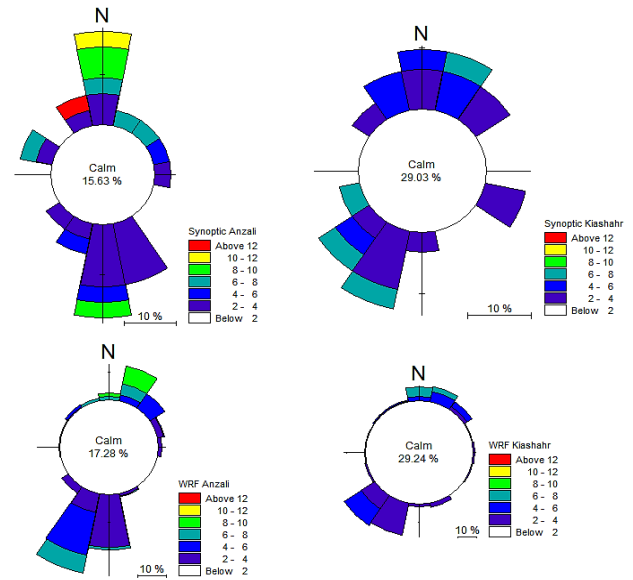
۳-۳ معرفی مدل

مدل مورد استفاده در این پروژه جهت مدل‌سازی امواج، مدول SW از بسته نرم‌افزاری MIKE21 می‌باشد. این مدل یک مدل نسل سوم است که بر اساس مش‌های ساختار نیافته^۱ بنیان شده و رشد، زوال و انتقال امواج ناشی از باد و امواج دوراً^۲ را در مناطق ساحلی و مناطق دور از ساحل شبیه سازی می‌کند. پدیده‌های مربوط به تولید امواج ناشی از باد در آب عمیق نظیر شکست در آب عمیق، (White Capping)، اندرکنش چهارتایی، (Quad Wave-Wave Interaction)، جفت‌شدگی میدان باد و موج، (Wind-Wave Coupling) از یک سو و فرآیندهای مرتبط با انتشار امواج، نظیر انکسار، (Refraction)، کم‌عمقی، (Shoaling) و تفرق ناشی از تغییرات عمق بستر، (Bed Induced)

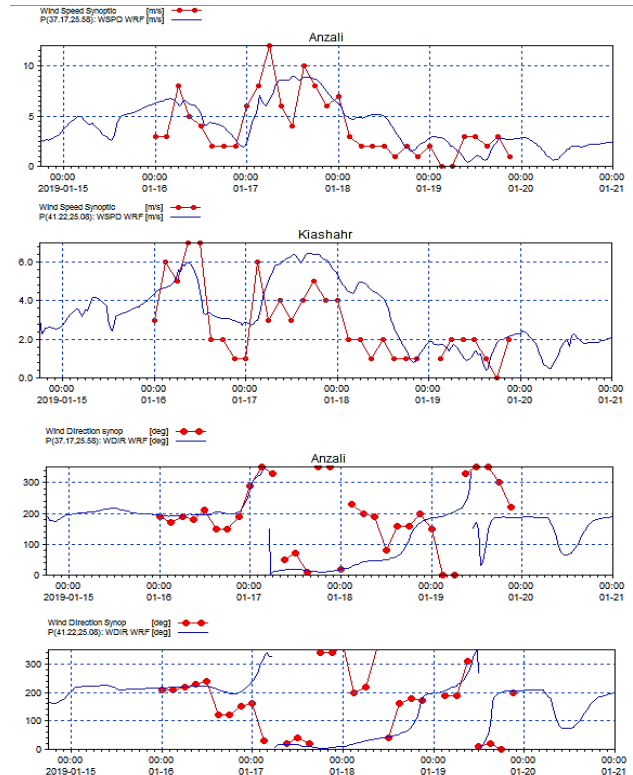
¹ unstructured meshes

² swell

ایستگاه‌های انزلی و کیشهر با داده‌های باد WRF به صورت گلباد و سری زمانی در زمان وقوع طوفان دی ماه ۹۷ در اشکال ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه باد هواشناسی در ایستگاه‌های انزلی و کیشهر، با نتایج مدل محلی جوی WRF (راست: کیشهر، چپ: انزلی)



شکل ۱۱: مقایسه سرعت و جهت باد ایستگاه‌های هواشناسی در انزلی و کیشهر، با نتایج مستخرج از خروجی مدل جوی WRF

بخش‌های چشمه و چاه استوار است. به‌منظور لحاظ کردن طبیعت تصادفی امواج دریا، معادله انتقال انرژی در شکل طیفی آن منظور می‌شود. از مهمترین ورودی‌های مدل فایل عمق نگاشت، شرایط مرزی باد و موج بوده که در بخش ۳-۲ نحوه آماده سازی آنها ارائه شد.

۴-۳ اجرا و واسنجی مدل

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر امواج از روش طیفی با فرمول بندی زمانی غیر پایدار و تکنیک حل از نوع دقت کم استفاده شده است. گسسته‌سازی فرکانسی نیز به صورت لگاریتمی با ۲۵ عدد فرکانس، کوچکترین فرکانس ۰/۰۵۵ و ضریب فرکانس ۱/۱ و گسسته سازی جهتی در ۱۶ جهت انجام شده است. همچنین، حداقل گام زمانی حل معادلات برابر با ۰/۰۱ ثانیه و حداکثر گام زمانی برابر با ۳۰ ثانیه انتخاب شده است. گام زمانی اجرای مدل نیز نیم ساعت (برابر با گام زمانی باد ورودی مدل) و به تعداد ۳۰۰ گام در نظر گرفته شده است تا یک هفته از ۱۴ ژانویه تا ۲۱ ژانویه را پوشش دهد.

در رابطه با واسنجی و صحت سنجی مدل بایستی توجه داشت که تنها داده ثبت شده موج در طی طوفان دی ماه ۱۳۹۷ در امیرآباد در نقطه ای به عرض جغرافیایی ۳۶/۹۳۴۴ و طول جغرافیایی ۳۶/۹۳۴۴ و عمق ۲۵ متری ثبت شده است. متاسفانه مسیرهای فراسنجی نیز در زمان وقوع این طوفان از دریای خزر عبور نکرده است. هر چند که بویه امیرآباد در سمت شرق دریای خزر واقع بوده و بسیار از بندر کاسپین دور است، ولی چون کل دریای خزر در اینجا مدل شده است، نتیجه مدل در امیرآباد با بویه مقایسه گردید که در شکل ۱۳ این مقایسه نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۳ و با عنایت به این مسئله که Hm_0 در حدود ۵ درصد بالاتر از H_s می‌باشد، تطابق رضایت بخشی بین نتایج مدل و بویه امیرآباد برقرار است. شیفت چند ساعته زمانی بین نتایج بویه و مدل، به دلیل ثبت داده‌های بویه به ساعت محلی است. درحالیکه باد ورودی مدل و نتایج آن بر اساس ساعت جهانی است.

سرانجام ضرایب واسنجی که شامل ضرایب شکست موج، اصطکاک بستر، پارامترهای مربوط به سفیدک راس موج (White Capping) و ضرایب انتقال انرژی هستند، با توجه به مقادیر پیشنهادی در پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل شمال کشور و

از سوی دیگر توسط این مدل لحاظ می‌شود. فرآیندهای انتشار موج در آب کم‌عمق نظیر استهلاک انرژی در ناحیه شکست، (Energy Dissipation)، و شکست موج، (Wave Breaking)، نیز توسط این مدل محاسبه می‌گردند (MIKE C-Map, 2017). به طور کلی مدول SW شامل دو فرمولبندی متفاوت از قبیل فرمولبندی پارامتریک تفکیک شده جهتدار^۱ و فرمولبندی کاملاً طیفی می‌باشد.

فرمولبندی پارامتریک تفکیک شده جهت دار بر اساس پارامترسازی معادله بقای کنش موج^۲ می‌باشد. این پارامترسازی در دامنه‌ی فرکانس و بوسیله معرفی مومنتوم صفرم و مومنتوم اول طیف کنش موج به عنوان متغیرهای مستقل انجام می‌شود. (Holthuijsen, 1989). فرمول بندی کاملاً طیفی نیز بر پایه معادله بقای کنش موج بوده و فرکانس جهت دار طیف کنش موج یک متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود (Komen, 1994; Young, 1999). معادلات بقای پایه، در دستگاه مختصات کارتیزین برای کاربردهای کوچک مقیاس و در دستگاه مختصات کروی قطبی برای کاربردهای بزرگ مقیاس فرمول بندی می‌شوند. از آنجاییکه مقیاس محدوده مورد مدلسازی در این پژوهش محلی و کوچک محسوب می‌شود، به ارائه روابط در دستگاه مختصات کارتیزین بسنده می‌شود. در دستگاه کارتیزین افقی، معادله بقای کنش موج به صورت رابطه ۱ خواهد بود.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

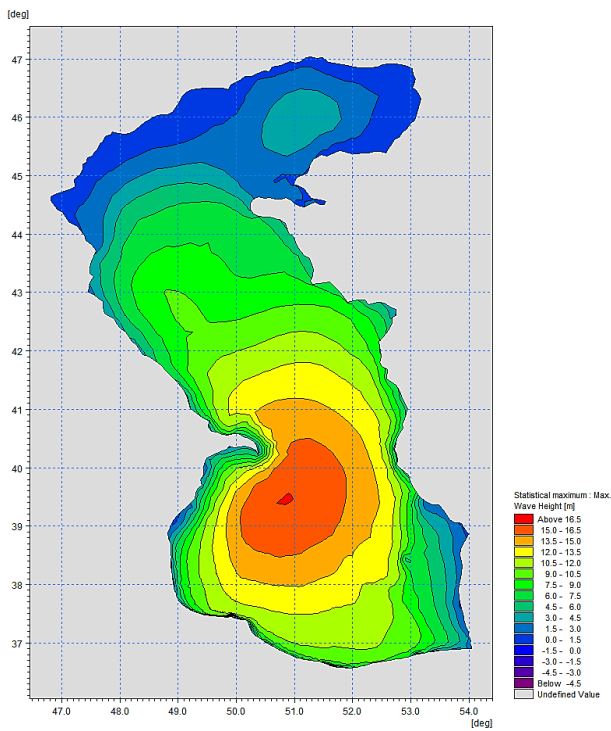
که در آن $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ چگالی کنش، t زمان، $\vec{x} = (x, y)$ مختصات کارتیزین، $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ سرعت انتشار امواج گروهی در فضای چهاربعدی و S ترم منبع (انرژی) در معادله تعادل انرژی می‌باشد.

حل معادله در این مدل بر مبنای روش حجم محدود (Finite Volume) و بر روی شبکه‌بندی مثلثی نامنظم صورت می‌گیرد که با ریز کردن ابعاد شبکه در محدوده موردنظر، می‌توان برآورد بهتری از مشخصات موج بدست آورد. در این پروژه، از مدول SW صرفاً برای مدلسازی فرآیندهای مرتبط با انتشار انرژی موج از آب عمیق به آب‌های ساحلی استفاده شده است. مبنای این مدل برای انتقال موج، بر حل معادله انتقال انرژی همراه با

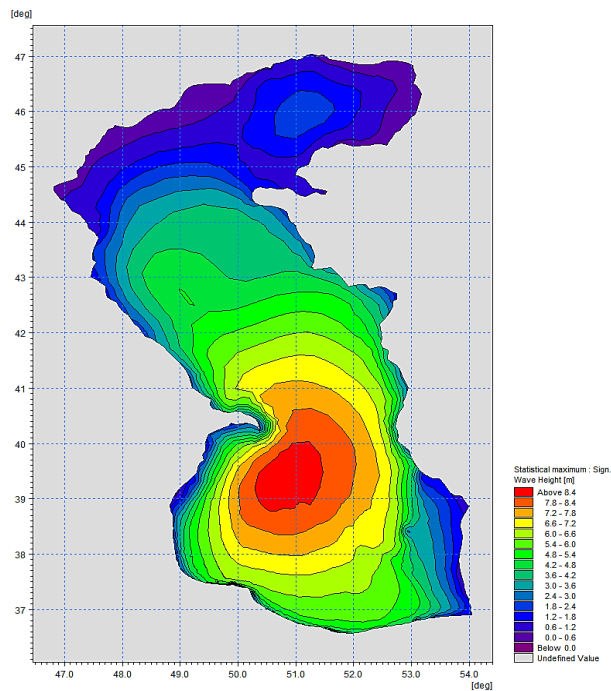
¹ directional decoupled parametric formulation

² wave action

موقعیت آن‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است، در شکل ۱۹ آمده است.

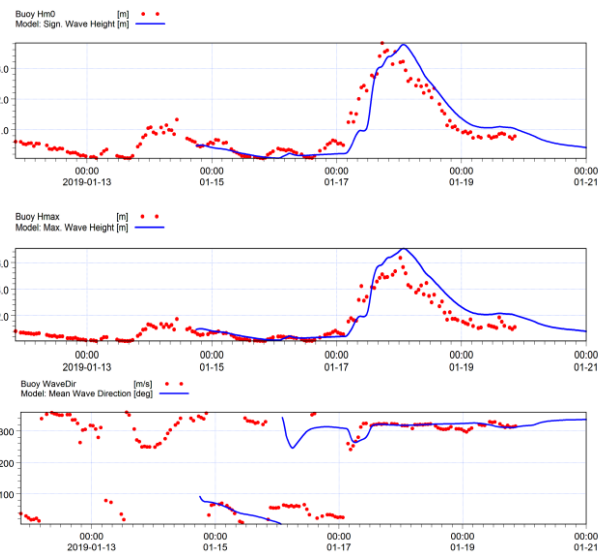


شکل ۱۴: نقشه بیشترین ارتفاع موج بیشینه رخ داده در زمان طوفان دیماه ۱۳۹۷ در دریای خزر



شکل ۱۵: نقشه بیشترین ارتفاع موج مشخصه رخ داده در زمان طوفان دیماه ۱۳۹۷ در دریای خزر

همچنین قضاوت مهندسی روی نتایج حاصل از اجرای چندین باره مدل با ضرایب مختلف، لحاظ گردیدند. بنابراین مقدار واسنجی شده ضریب شکست موج گاما برابر با 0.8 ، آلفا برابر با 1 ، ضریب اصطکاک بستر شامل زبری (K_{II}) برابر با 0.02 و ضرایب C_{ds} و δ برای سفیدک راس موج، White Capping، به ترتیب $1/10$ و 0.8 در نظر گرفته شدند. همچنین ضریب انتقال انرژی اندرکنش سه نقطه‌ای، Triad، برابر با 0.25 و ضریب انتقال انرژی چهارنقطه‌ای، Quadruplet، فعال شده است.

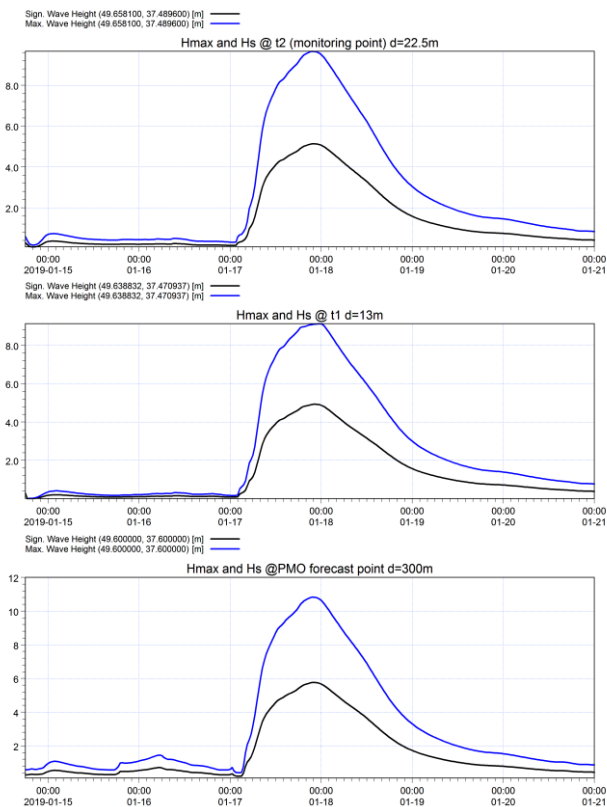


شکل ۱۳: مقایسه نتایج مدل طوفان دی ماه ۱۳۹۷، با داده‌های ثبت شده در بویه امیرآباد (از بالا به پایین: موج مشخصه، موج بیشینه، جهت موج)

۴. نتایج و بحث

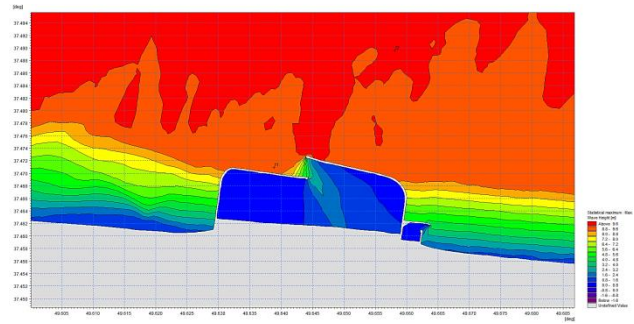
با توجه به مدلسازی انجام شده بر روی داده‌های امواج ۳۰ ساله پروژه پایش شمال، نقشه مشخصات بیشترین H_s و H_{max} رخ داده در هر گره محاسباتی در طی این طوفان در اشکال ۱۴ و ۱۵ در کل دریای خزر و در اشکال ۱۶ و ۱۷ در حوالی بندر کاسپین نمایش داده شده است. به دلیل اینکه مدول SW از تئوری موج خطی استفاده می‌کند، نتایج آن تا عمق حدود ۱۰ متر قابل اعتماد بوده و در اعماق کمتر بایستی با استفاده از تئوری‌های موج غیرخطی نظیر مدل‌های Goda یا Fenton ارتفاع تاج موج را تعیین نمود. نتایج مدل در سه نقطه پایش شمال (عمق ۲۲/۵ متر)، نقطه‌ای در ۱۰۰ متری محلی که در آن تخریب موضعی رخ داده است (عمق ۱۳ متر) و نقطه مدل پیش‌بینی سازمان بنادر که

اتفاق افتاده است. با علم به اینکه موج با دوره بازگشت ۳۰ ساله در نقطه پایش ۵/۵ متر است، می‌توان نتیجه گرفت که طوفان رخ داده دوره بازگشتی در حدود ۲۰ سال داشته است. ارتفاع موج ۵/۰۸ متر در نظر گرفته شده جهت طراحی، هر چند که موج ۱۰۰ ساله نیست ولی بیشتر از ارتفاع موج رخ داده در محل آسیب یعنی ۴/۹ متر بوده است. بنابراین شسته شدن موضعی در اثر پدیده روگذری امواج به دلیل عدم تکمیل پوشش گذاری در بخش فوقانی سازه موج شکن در حال ساخت، (exposed)، در هنگام وقوع طوفان، محتمل‌ترین دلیل این تخریب بوده و به نظر می‌رسد با وجود اینکه موج طراحی در نظر گرفته شده به میزان ۵/۰۸ متر دست پایین محاسبه شده است، اما موج‌شکن در طوفان اخیر دارای مشکلات پایداری سازه نبوده است.

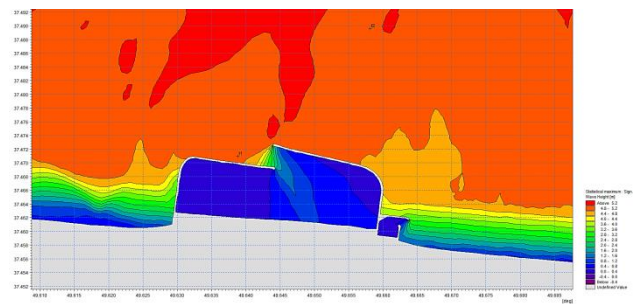


شکل ۱۹: سری زمانی موج مشخصه و موج بیشینه در زمان طوفان دیماه ۹۷ در نقطه پایش t_2 (بالا)، نقطه نزدیک به منطقه تخریب t_1 (وسط) و نقطه پیش-بینی سازمان بنادر (پایین)

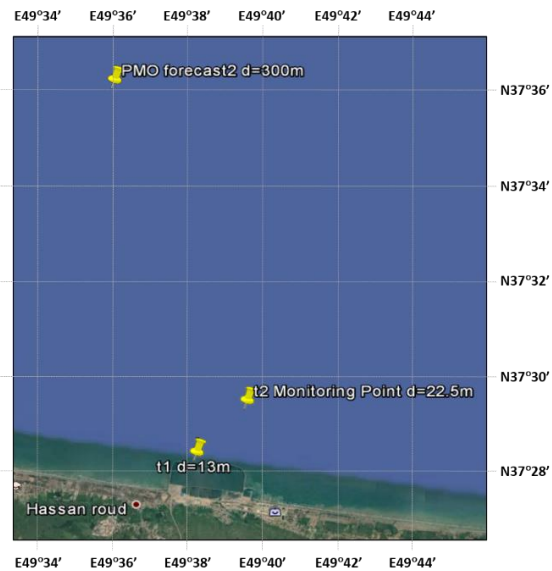
در شکل ۱۹ با مقایسه نقطه خروجی پیش‌بینی سازمان بنادر و نتایج مدلسازی صورت گرفته در این تحقیق، نشانگر دست پایین بودن نتایج مدل پیش‌بینی سازمان بنادر یعنی Hmax برابر با ۹ متر (مطابق با گزارش نتایج پیش‌بینی ارتفاع امواج از مدل پیش‌بینی



شکل ۱۶: نقشه بیشترین ارتفاع موج بیشینه رخ داده در زمان طوفان دیماه ۱۳۹۷ در بندر کاسپین



شکل ۱۷: نقشه بیشترین ارتفاع موج مشخصه رخ شده در زمان طوفان دیماه ۱۳۹۷ در بندر کاسپین



شکل ۱۸: موقعیت نقطه t_1 ، نقطه اطلاعات موج پروژه پایش شمال t_2 و نقطه پیش‌بینی سازمان بنادر

با توجه به شکل ۱۹، ارتفاع موج مشخصه ۵/۲ متری و ارتفاع موج بیشینه ۹/۷ متری در نقطه پایش و ارتفاع موج مشخصه ۴/۹ متری و ارتفاع موج بیشینه ۹/۱ متری در ۱۰۰ متری محل آسیب

- using MIKE21 model and Iranian model PMODynamics and comparison of results with observational data. Proceedings of the 1st national conference on sea-based sustainable development. Jan. 28-29, 2015. Khorramshahr University of Marine Science and Technology. 1145P. [In Persian]
- Ghorbani Taleghani, M.; Golshani, A., 2011. Study of wave climate in amir abad port using setup of local model and semi-analytical methods. Journal of the Earth and Space Physics, 37(2): 193-210. [In Persian]
- GOEAF (Gilan Organization of Economic Affairs and Finance), 2017. Eco Caspian 20. GOEAF: 15-16. [In Persian]
- Golshani, A.; Taebi, S; and Chegini. V., 2007. Wave hindcast study and extreme value analysis for the southern part of the Caspian Sea. Coastal Engineering Journal, World scientific, 49(4): 443-459. [In Persian]
- Holthuijsen, L.H.; Booij, N.; Herbers, T.H.C., 1989. A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents. Coastal Engineering, 13(1): 23-54.
- IWFD (Iran Wave Forecast Database), 2019. Ports and Maritime Organization. Retrieved October 11, 2019. <http://waveforecast.pmo.ir/> [In Persian]
- Jafari, A.; Moeini, M.; Jandaghi Alae, M.; Akbarzadeh, B., 2012. Evaluation of the use of QuikSCAT satellite wind data for wave modeling in the Caspian Sea. Proceedings of the 14th Conference on Marine Industries. Dec. 26-27, 2012. Iran Association of Naval Architecture and Marine Engineering. 2205P. [In Persian]
- Jandaghi Alae, M.; Golshani, A.; Nakhaee, A.; Taebi, S.; Chegini, V., 2005. Wave Hindcast Study of the Caspian Sea. Marine-engineering, 1(2): 55-61. [In Persian]
- Komen, G.J.; Cavaleri, L.; Doneland, M.; Hasselmann, K.; Hasselmann, S.; Janssen, P.A.E.M., 1994. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, Cambridge, 450 pp.
- سازمان بنادر و دریانوردی) نسبت به ۱۱ متر محاسبه شده در این تحقیق است. از جمله دلایل این مسئله، افزایش باد WRF در حوالی بندر انزلی که در نتیجه مقایسه با داده‌های باد ایستگاه هواشناسی انزلی انجام شده است؛ تفکیک مکانی بهتر (۰/۱۰ درجه) مدل موج مایک استفاده شده در این تحقیق نسبت به تفکیک مکانی ۰/۱ درجه مدل موج WaveWatch پیش‌بینی سازمان بنادر و همچنین استفاده از فایل عمق نگاهت دقیق‌تر در مدلسازی این تحقیق را می‌توان نام برد.
- ۵. تشکر و قدردانی**
- نویسندگان مقاله مراتب تشکر خود را از سازمان بنادر و دریانوردی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و سازمان هواشناسی به ترتیب برای در اختیار گذاشتن داده‌های موج بویه امیرآباد، داده‌های باد مدل WRF و داده‌های باد هواشناسی انزلی و کپاشهر اعلام می‌دارند. همچنین از مهندسین مشاور فرادریاعرشه جهت تامین مالی این پژوهش قدردانی و تشکر می‌گردد.
- منابع**
- Abedinzadeh, N.; Moghadami, S; Haghighi Khomami, M., 2015. Prioritization of environmental risk assessment of Caspian port in Anzali Free Zone using TOPSIS and AHP methods. International Conference on Science and Engineering. [In Persian]
- CPCW (Caspian Port Complex Website), 2019. Anzali Free Zone Organization. Retrieved October 11, 2019. <http://caspianportcomplex.com/fa/#port-info> [In Persian]
- Fallah, A.; Karami Khaniki, A.; Layeghi, B., 2006. Evaluation of MIKE21 and WAM models in simulation of Caspian Sea waves. Proceedings of the 07th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures. Nov. 27-29, 2006. Ports and Maritime Organization. 1179P. [In Persian]
- Fotouhi, A.; Khalilizadeh, M.; Bahmanpouri, F., 2015. Simulation of Caspian Sea waves with satellite data

- Journal of Environmental Sciences, 3(0): 45-52. [In Persian]
- Siadatmousavi, S.; Badiei, P.; Kebriaei, A.; Maraghaei, A., 2006. Comparison of the results of the mathematical models for determining the characteristics of wind-induced waves, and local measurements in the southern part of the Caspian Sea. Proceedings of the 07th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures. Nov. 27-29, 2006. Ports and Maritime Organization. 1179P. [In Persian]
- WRF (Weather Research and Forecasting model), 2019. NCAR. Retrieved October 11. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- Young, I.R., 1999. Wind generated ocean waves. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Volume 2. Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.
- Zamani, A.; Azimian, A., 2008. Regional modeling of Caspian Sea waves under the influence of wind field using neural network method. Proceedings of the 07th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures. May 27-29, 2008. K. N. Toosi University of Technology. 1659P. [In Persian]
- Press. UK. 560P.
- Layeghi, B.; Zahedi, R., 2018. Numerical prediction of wind-induced waves in the Caspian Sea using the MIKE21 model. Proceedings of the 4th International Conference on Oceanographic Oceanography in the Persian Gulf. Feb. 17-18, 2018. Iran Meteorological Organization. [In Persian]
- Majdi. B.; Kebriaei, A.; Danehkar, A; Soltanpoor, M., 2008. Overall assessment of natural hazards on the coast of Iran, ICOPMAS08. [In Persian]
- Mike C-Map., 2017. User Guide, DHI Water and Environment.
- PMO (Ports and Maritime Organization), 2014. Integrated Coastal Zone Management of Iran (Process and Achievement), PMO. [In Persian]
- PMO (Ports and Maritime Organization), 2015. Report on 30-year Caspian Sea Wave hindcast Modelling, PMO. [In Persian]
- RDA (Research Data Archive), 2019. NCAR. Retrieved October 11, 2019. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>
- Sharifipoor, R.; Danehkar, A.; Nori Danehkar, J., 2005. Assessment of physical sensitivity of Bushehr province coastal zone based on environmental sensitivity Index.