

یک مدل دوبعدی کارآمد برای بررسی جزئیات مد توفان در دریای خزر بکار رفته است. این مدل از روش اختلاف محدود کاملاً ضمنی و شبکه با ابعاد متغیر برای حل معادلات حرکت انتگرال‌گیری شده در عمق و معادله پیوستگی، استفاده می‌کند. ترمهای گرادیان فشار جو، تنش باد، نیروهای جزرومدی، اصطکاک کف و جانی، نیروی کریولیس و شناپهای انتقالی همگی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین این مدل تر و خشک شدن سلولها را در نظر دارد. بنابراین این مدل می‌تواند برای محاسبه گردشهای جزرومدی، مد توفان و جریانات کنار ساحلی بکار رود. سیستم شبکه با ابعاد متغیر برای حل بهتر در زیر مناطق معین شده بکار رفته است. مدل می‌تواند به آسانی برای دیگر کاربردها اختیار و برقرار شود. این مدل می‌تواند روی کامپیوتر شخصی با کارایی کافی اجرا شود. برای سیستم غیر خطی بکار گرفته شده در این تحقیق، گام زمانی باید به طور تجربی بدست آید و معمولاً از گام زمانی بکار رفته در طرح صریح خیلی بزرگتر است. بهرحال، باید توجه داشت که مقدار آن، آنقدر بزرگ انتخاب نشود که در اثر نیروهای وابسته به زمان تأثیر منفی بگذارد. این مدل همچنین یک چارچوب پایه را برای مطالعات آینده روی جریانات ناشی از امواج تهیه می‌کند زیرا که ترمهای تنش تشعشعی می‌توانند به معادلات حرکت افزوده و بطور مشابه حل شوند. این مقاله الگوریتم پایه و کاربرد این مدل در دریای خزر برای بررسی جریانات باد رانده و مد توفان با در نظر گرفتن شرایط دریای خزر را نشان می‌دهد.

مدل دوبعدی، مد توفان، دریای خزر، اختلاف محدود، کاملاً ضمنی، شبکه متغیر، الگوی جریان، نوسانات سطح

آب.

توفان در اثر بروز توفان رخ می‌دهد (توفان یک اغتشاش جوی می‌باشد که توسط بادهای تند مشخص می‌گردد و ممکن است همراه بارندگی باشد یا نباشد). توفانها نیز به دو دسته توفانهای برون حاره‌ای (Extratropical Storm) و توفانهای حاره‌ای (Tropical Storm) تقسیم می‌شوند.

دریای خزر نیز با توجه به توفانهای شدید که هرازگاه آن را مورد تاخت و تاز قرار می‌دهد، دارای سابقه طولانی از خسارات ناشی از مد توفان است [۱]، حداکثر ارتفاع مشاهده

یکی از مهمترین مراحل در طراحی سازه‌های ساحلی، بهره‌برداری از منابع نفت و گاز فلات قاره و دیگر پروژه‌های مهندسی در سواحل، برآورد تغییرات تراز آب و بخصوص تعیین و بررسی جزرومدها و مدهای توفان (Storm surge) در منطقه مورد مطالعه است [۱].

لذا با توجه به اهمیت بررسی مد توفان تحقیقات زیادی در این مورد صورت گرفته است. باید توجه داشت که مد

خط راه آهن Astarakhan-Kizlyar در نقاطی ویران شد. موج شکل گرفته به ارتفاع ۲ متر با سرعتی معادل ۵ تا ۸ متر بر ثانیه در منطقه شروع به حرکت کرد و در مجموع خسارات زیادی به ناوگان کشتیرانی شیلات، سازه‌های زیربنایی ساحلی و خصوصاً تاسیسات ماهیگیری وارد آمد [۱].

دریای خزر را بزرگترین دریاچه جهان نامیده‌اند. ولی این دریاچه از نظر مساحت و نیز جریان دگرگونیهای درون آن به دریا بیشتر شباهت دارد، بویژه که بنا بر تحقیق محققان روزگاری دریای خزر به دریای سیاه و دریاهای آزاد متصل بوده ولی بعد ها در نتیجه دگرگونیهای ارضی رابطه آن با دریاهای آزاد قطع شده و به صورت یک دریای بسته درآمده است. در (جدول ۱) خصوصیات عمومی دریای خزر ارائه گردیده است.

شده مد توفان در دریای خزر در ناحیه شمالی آن اتفاق افتاده که اندازه آن ۴ تا ۴/۵ متر گزارش شده است.

در نواحی شمال غربی دریای خزر نیز مد توفانهایی با ارتفاع حدود ۲ متر مشاهده شده است. برای نمونه می‌توان به توفان ۲۵ تا ۲۷ نوامبر سال ۱۹۱۰ اشاره کرد که با جهتی شرقی و با سرعت ۲۰ تا ۲۶ متر بر ثانیه، ارتفاعی معادل ۲/۰۳ متر ایجاد کرده است [۱].

همچنین در ۱۳ نوامبر سال ۱۹۵۲ در نزدیکی Tulneg Island خیزآب در حدود ۲/۴ متر، در محدوده Bryanskaya Kosa در حدود ۲/۵ متر و در نزدیکی Caspiysk خیزآب ۳/۶ متری گزارش شده است که در نتیجه آن قسمتهای وسیعی از سواحل غربی در حدود ۴۰ کیلومتر از ناحیه ساحلی و در بعضی مناطق تا ۵۵ کیلومتر زیر آب رفتند و

خصوصیات عمومی دریای خزر

۳۷۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع	مساحت کل حوضه آبریز	
۲۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع	مساحت حوزه آبریز واقع در خاک ایران	
۷۷۸۶۰ کیلومتر مکعب	حجم آب دریای خزر	
۷۰۰۰ کیلومتر	طول محیط دریای خزر	
۱۰۰۰ کیلومتر	طول ساحل ایران	
۴۲۲۰۰۰ کیلومتر مربع	ماکزیمم	مساحت خزر
۳۷۱۰۰۰ کیلومتر مربع	مینیمم	
۳۹۳۰۰۰ کیلومتر مربع	میانگین	
۱۲۰۰ کیلومتر	طول دریا	
۵۵۴ کیلومتر	بزرگترین عرض	عرض خزر
۲۰۰ کیلومتر	باریکترین عرض	
۳۲۰ کیلومتر	عرض متوسط	
۱۱۰۰ متر	عمق گودترین نقطه	عمق خزر
۱۸۰ متر	عمق متوسط دریای خزر	
مختصات غرب و شرق خزر		مختصات شمال و جنوب خزر
۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی		۴۷ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی
۵۴ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی		۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی

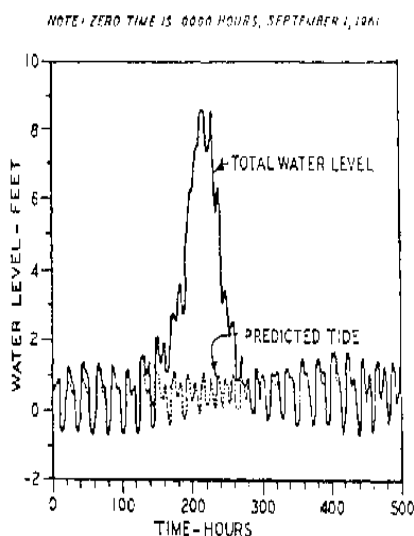
بگذارند، وابسته است. عوامل مجزای بیرونی مؤثر در ارتفاع مد توفان، جزرو مد نجومی، اختلاف فشار جو، چرخش زمین، میزان بارش، خیز آب امواج و بادهای مستقیم و موازی ساحل می‌باشند. مد توفان بر خلاف امواج بلند دیگر مثل جزرومد و سونامی در حوزه های آبی بسته یا نیمه بسته، دریاهای کوچک، دریاچه ها، کانالها و رودخانه‌ها نیز می‌تواند رخ بدهد [۱].

مد توفان بزرگترین مخاطره طبیعی حتی برتر از زمین لرزه‌ها می‌باشند [۳]. مد توفان‌ها خسارات واقعاً بزرگی را به اقتصاد ملی کشورهای ساحلی وارد می‌کنند و همچنین موجب مرگ و میر انسانها و نابودی زیر ساختهای اقتصادی در مناطق ساحلی می‌شوند. لذا تحقیقات فراوانی در مورد مد توفان و روشهای پیش بینی آن در سرتاسر دنیا انجام گرفته است. دریای خزر نیز با توجه به توفانهای شدید که هرازگاه آن را مورد تاخت و تاز قرار می‌دهد، دارای سابقه طولانی از خسارات ناشی از مد توفان است [۱] ماکزیمم ارتفاع مشاهده شده مد توفان در دریای خزر در ناحیه شمالی آن اتفاق افتاده که اندازه آن ۴ تا ۴/۵ متر گزارش شده است.

رخدادهای متعددی نیز در جنوب خزر در رابطه با پدیده مد توفان گزارش شده است. اما به دلیل نبود اطلاعات سنجش سطح آب در کل نوار ساحلی، خیز آب‌های بوجود آمده به طور مشخص ثبت نشده‌اند. از جمله می‌توان به توفان ۱۳ نوامبر سال ۱۹۹۳ اشاره کرد که طی آن نیروگاه نکاء به دلیل بالا آمدگی بی سابقه آب دچار مشکل گردید. در این تاریخ ایستگاه اندازه گیری سطح آب در بندر انزلی نیز ۵۵ سانتی متر خیز آب را نشان داد. ولی متأسفانه تنها ایستگاه هواشناسی بابلسر سرعت ۹۱ نات و جهت ۲۸۰ درجه را برای این توفان در ۱۴ نوامبر سال ۱۹۹۳ ثبت کرد و هیچ ایستگاه دیگری سرعت و جهت آن را ثبت نکرد. لذا نمی‌توان اطلاعات کافی در مورد سرعت و جهت و طول مدت زمان وزش این توفان برای مدلسازی آن داشت.

با عنایت به موارد ذکر شده فوق و همچنین روند نوسانات کلی سطح آب دریای خزر که در سالهای اخیر رو به افزایش

پدیده‌های مؤثر در تغییرات تراز آب، مد توفان، جزرومد نجومی (Astronomical tide)، نوسانات عمومی (مثل ذوب یخها و تغییرات دراز مدت سطح آب در اثر تغییر شکل پوسته زمین)، سونامی (Tsunami)، اثرات اقلیمی (مثل تغییرات فصلی یا درازمدت تراز آب در اثر گرمایش و سرمایش فصلی ستون آب یا تغییرات فصلی در میدان باد)، امواج Seich و خیز آب امواج (Wave setup) می‌باشند [۲]. مد توفان از اصلی ترین عوامل تغییر تراز آب در مناطق کم عمق ساحلی می‌باشد (شکل ۱) تراز آب ثبت شده در طی توفان کارلا در تگزاس و ارتفاع جزر و مد پیش بینی شده برای آن منطقه را نشان می‌دهد که اختلاف بین آن و در اثر مد توفان می‌باشد و بیانگر اهمیت مد توفان در مقایسه با جزرو مد است. مد توفان به ترکیب پیچیده پارامترهای هواشناسی و توپوگرافی حساس است و از عملکرد ترکیبی تنش باد و کاهش فشار اتمسفر در ناحیه کم عمق فلات قاره ناشی می‌شود. مد توفان به شدت و مسیر توفان و مشخصه‌های مکانی و زمانی آن، عرض جغرافیایی منطقه، مشخصات و هیدروگرافی حوضه، حالت ابتدایی سیستم و تأثیرات دیگری که می‌توانند از بیرون بر سیستم تأثیر



ارتفاع آب ثبت شده در طی توفان کارلا در تگزاس و مقایسه آن با جزرومد پیش بینی شده در آن منطقه

اختلاف محدود و از شبکه نقاط با ابعاد متغیر استفاده شده است. متغیر بودن ابعاد شبکه حل به ما این امکان را می‌دهد که برای پوشش دادن مناسب منطقه حل از شبکه درشتتر و برای دقت بیشتر در مناطق دلخواه از منطقه حل، از شبکه با ابعاد زیرتر استفاده کنیم. همچنین با توجه به پایداری روشهای ضمنی نسبت به روشهای صریح در این تحقیق از یک روش کاملاً ضمنی (Economic Fully Implicit) استفاده شده است. مدل به کار رفته در این تحقیق همچنین قابلیت در نظر گرفتن تر و خشک شدن سلولها و همچنین دریافت تنشهای تشعشی (Radiation Stress) از مدل موج و تأثیر دادن آنها در معادلات را دارد در نتیجه این مدل قابلیت در نظر گرفتن مرزهای متغیر را دارد. در این مدل پارامترهای گردایان فشار جو، تنش باد، نیروهای جزرومدی، اصطکاک کف و جانبی، نیروی کریولیس و شتابهای انتقالی (Convective acceleration) در نظر گرفته شده‌اند. لذا این مدل می‌تواند برای محاسبه گردشهای جزرومدی، مد توفان و جریانهای کنار ساحلی بکار رود. از آنجایی که در این مدل بهینه سازی‌های فراوانی بکار رفته است قابلیت اجرا روی کامپیوترهای شخصی در کمترین مدت زمان ممکن را دارد.

معادلات حاکم بر پدیده مد توفان همان معادلات آبهای کم عمق می‌باشند که در حل مسائلی از قبیل: جریانهای اتمسفری، جریانهای جزرومدی، مد توفان، جریانهای رودخانه‌ای، جریان در اطراف سازه‌ها، امواج ناشی از شکست سد، جریانهای ساحلی و امواج ناشی از زلزله و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ارائه این معادلات از قوانین سه گانه بقاء که خود بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک بنا شده‌اند، یعنی، قانون بقاء جرم، بقاء اندازه حرکت و بقاء انرژی استفاده شده است.

شکل معادلات دو بعدی انتگرال گیری شده در عمق (معادلات حرکت و معادله پیوستگی) بصورت زیر می‌باشند:

می‌باشد، لزوم بررسی دقیق پدیده از ابعاد مختلف روشن می‌گردد. روشهای موجود برای پیش بینی مد توفان عبارتند از: روشهای داده تاریخی (Historical Date Approach)، روشهای تجربی (Empirical methods) و روشهای تئوری (Theoretical Approach). روشهای تئوری خود به دو نوع روشهای عددی (Numerical methods) و روشهای تحلیلی (Analytical methods) تجزیه می‌شوند. روش داده‌های تاریخی و روش تجربی نیازمند آمار و اطلاعات طولانی مدت هستند و روش تجربی برای منطقه‌ای خاص قابل اجراست و با توجه به معایبی که دارند، روشی مطمئن و مناسب برای پیش بینی مد توفان نمی‌باشند. روش تحلیلی نیز با توجه به پارامترهای مؤثر زیاد در پدیده مد توفان و به سبب مشکلات ریاضی آن روش مناسبی برای بررسی پدیده مد توفان نمی‌باشد اما با توجه به افزایش قدرت محاسباتی در سالهای اخیر و استفاده از کامپیوترهایی که می‌توانند حجم بالایی از محاسبات را در زمان کوتاهی انجام دهند، همچنین پیشرفت و ارائه روشهای عددی کارآمدتر، استفاده از روشهای عددی برای پیش بینی مد توفان بهترین روش می‌باشد. روشهای عددی ممکن است که دو بعدی یا سه بعدی، صریح (Explicit) یا ضمنی (Implicit) باشند و از روش اختلاف محدود (F.D) یا المان محدود (E.F) یا احجام محدود (F.V) یا اجزاء مرزی (B.E) استفاده کنند. که هر کدام از این روشها می‌توانند از روشهای بسط پس رو (Back ward)، پیشرو (Forward) یا مرکزی (Central) یا ترکیبی از آنها استفاده کنند. بر این اساس روشهای عددی تنوع بسیار دارند و با توجه به هدف تحقیق می‌توان از روشهای مختلف استفاده کرد. در این تحقیق نیز سعی شده است که از بهترین روش عددی ممکن برای پیش بینی مد توفان استفاده شود. با توجه به سادگی و سهولت و اقتصادی بودن استفاده از مدل‌های دوبعدی نسبت به مدل‌های سه بعدی و همچنین دقت خوب آنها و قابل اجرا بودن روی کامپیوترهای شخصی به دلیل پایین تر بودن حجم محاسبات [۴] در این تحقیق از یک مدل دو بعدی استفاده شده است. همچنین با توجه به سادگی و اعمال راحتتر روشهای اختلاف محدود در اینجا از روش

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^2/d}{\partial x} - \frac{\partial q_x q_y/d}{\partial y} - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d}{\rho} \frac{\partial \tau_1}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{xs} - \tau_{xb}) + fq_y \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = -\frac{\partial q_x q_y/d}{\partial x} - \frac{\partial q_y^2/d}{\partial y} - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - gd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{d}{\rho} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{ys} - \tau_{yb}) - fq_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

در بسیاری از کارها در نتیجه مطالعات تجربی می‌توانیم  $y=3$  را  $3_x = 3$  قرار دهیم که دامنه تغییرات 3 از 0/0001 تا 0/1 می‌باشد [6]. ضریب درگ نشان داده شده در معادله (7) برای یک رنج پهنای سرعت‌های باد از نسیم تا هاریکن قابل اجراست. در اکثر قریب به اتفاق مدل‌های موجود ضریب اصطکاک کف ( $f_d$ ) در بازه 0/01 تا 0/04 می‌باشد.

برای محاسبه امواج گرانی - اینرسی، یعنی حرکات ایجاد کننده جزرومد و مد توفان، مناسب‌ترین شبکه نقاط، شبکه آراکاوای C (Aralcawa C) می‌باشد [1] شبکه آراکاوای C محاسبات را در کمترین زمان و فضای مورد نیاز کامپیوتری امکان پذیر می‌کند. لذا در این تحقیق از یک شبکه نقاط مشابه شبکه آراکاوای C استفاده شده است با این تفاوت که در اینجا بجای برابر بودن ابعاد شبکه در دو جهت  $x, y$  از شبکه با ابعاد متغیر استفاده شده است که شکل این شبکه به صورت شماتیک در (شکل 2) نشان داده شده است و همچنین در این شبکه موقعیتهایی که در آنها ارتفاع سطح آب و حجم جریان جاری محاسبه شده‌اند، نشان داده شده است. برتری این شبکه نسبت به شبکه آراکاوای C متغیر بودن ابعاد شبکه است زیرا می‌توان برای کاهش محاسبات و صرف کمتر زمان و فضای کامپیوتر برای پوشش کافی و مناسب منطقه مورد مطالعه از شبکه های بزرگتر استفاده نمود و برای افزایش دقت در مناطق مورد نظر از منطقه مورد مطالعه از شبکه های با ابعاد کوچکتر استفاده کرد. در این مدل نیز

در اینجا  $q_x$  و  $q_y$  مولفه های حجم جریان آب در جهت‌های  $x$  و  $y$ ،  $d = h + \eta$  کل عمق آب،  $h$  عمق ثابت آب،  $\eta$  نوسان سطح آب،  $p$  فشار اتمسفر،  $\rho$  چگالی آب،  $t$  زمان،  $g$  گرانش،  $f = 2\Omega \sin \varphi$  سرعت زاویه ای چرخش زمین،  $\varphi$  عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه،  $\tau$  تنش افقی (زیر نویس  $x, y$  بر جهت تنش، زیر نویس  $s, b$  بر محل تنش (سطح یا کف) و زیر نویس 1 بر اصطکاک پهلوها ناشی از اغتشاش دلالت دارند) می‌باشند. ترم اصطکاک جانبی بیشتر در مرزهای خشکی پیچیده کاربرد دارد. در بسیاری از مدل‌های مشابه از برخی از ترمها منجمله اصطکاک جانبی، ترمهای انتقالی، فشار جو و ... صرف نظر می‌کنند. تنشها از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$(\tau_{xs}, \tau_{ys}) = \rho_a C_d |W|(W_x, W_y) \quad (4)$$

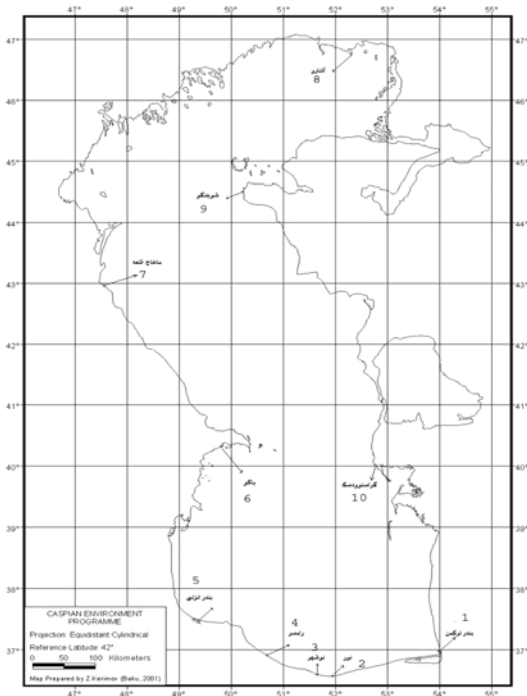
$$(\tau_{xb}, \tau_{yb}) = \frac{\rho_a f_d}{8d^2} Q(q_x, q_y) \quad (5)$$

$$\tau_1 = \rho (\varepsilon_y \frac{\partial q_x/d}{\partial y} + \varepsilon_x \frac{\partial q_y/d}{\partial x}) \quad (6)$$

در اینجا  $\rho_a$  چگالی هوا،  $C_d$  ضریب درگ باد،  $|W|$  اندازه کل سرعت باد،  $W_x$  و  $W_y$  مولفه‌های سرعت باد،  $Q$  کل حجم جریان آب،  $f_d$  ضریب اصطکاک کف داریسی و ایسباخ (Darcy-Weisbach)،  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  ضرایب ادی ویسکوزیته پهلوها (lateral eddy viscosity) می‌باشند که ضریب درگ با توجه به محاسبات و تحقیقات آقای Wu به صورت زیر به دست می‌آید [5].

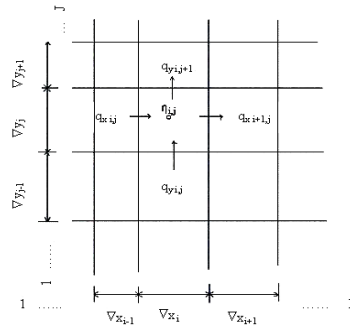
$$C_d = (0.8 + 0.065 \times W) \times 10^{-3} \quad (7)$$

matlab شکل خطوط ارتفاع آب و بردارهای الگوی جریان برای تمام منطقه دریای خزر در زمانهای دلخواه ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت از زمان شروع توفان و همچنین منحنی ارتفاع آب برای ۱۰ منطقه دلخواه و مهم در دریای خزر در طول زمان رخداد توفان رسم گردیدند، این ۱۰ منطقه رکوردگیری بنادر و نقاط مهم موجود در دریای خزر در نظر گرفته شده‌اند که موقعیت آنها در (شکل ۳) نشان داده شده است. در این تحقیق با توجه به آمار باد موجود در ایستگاههای هواشناسی جنوبی خزر آمار سریعترین بادهای رخ داده در این ایستگاهها، از زمان تأسیس تا سال ۱۹۹۵ در ماههای مختلف سال استخراج گردیده‌اند. سپس با بررسی اجمالی این آمار مشخص گردید که اکثریت توفانهای رخ داده در دریای خزر که توسط این ایستگاهها ثبت شده است، دارای جهت‌های شمال یا شمال شرقی یا شمال غربی و پهنای سرعت حدود ۱۵m/s تا ۲۵m/s را داشته‌اند. لذا ما در این تحقیق برای پوشش دادن کافی به اکثریت حالتها ممکن برای توفانهای خزر جهت و سرعت باد را در سه جهت



حوزه دریای خزر و نقاطی که در آنها ارتفاع آب رکوردگیری و رسم شده است.

همانند اغلب مدل‌های دیگر شرایط اولیه را در لحظه  $t=0$  حالت سکون در نظر گرفته‌ایم.



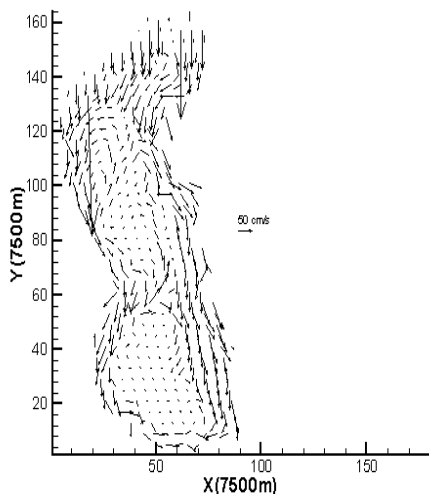
سیستم شبکه با ابعاد متغییر بکار رفته در مدل.

در این حالت سرعتها در تمام جهت‌ها صفر است و همچنین معمولاً ارتفاع آب را نیز صفر در نظر می‌گیرند که البته می‌توان یک مقدار اولیه را نیز برای آن در نظر گرفت. در این تحقیق از طرح عددی اختلاف محدود استفاده شده است و همچنین، همانگونه که در مقدمه بیان شد در آن از روش کاملاً ضمنی استفاده شده است.

در این مدل با توجه به پایداری روشهای ضمنی می‌توان گام زمانی را بدون نقض پایداری مدل بر خلاف روشهای صریح افزایش داد. اما باید توجه داشت که گام زمانی را نباید آنقدر بزرگ انتخاب کرد که در اثر نیروهای وابسته به زمان مثل نیروهای جزر و مد، باد و گرادیان فشار تأثیر منفی بگذارد و موجب نادیده گرفته شدن تغییرات آنها در طول زمان شود.

ابتدا این مدل برای حوزه‌ای مستطیل شکل با عمق ثابت اجرا شد و جوابهای آن با حل‌های تحلیلی و دیگر مدل‌های موجود از جمله مدل ۲۱ mike کنترل گردید و این مقایسه دقت بسیار خوب مدل و همخوانی آن با دیگر مدل‌های استاندارد موجود و همچنین حل‌های تحلیلی [۷، ۸] را نشان داد. سپس این مدل برای دریای خزر اجرا گردید و با استفاده از خروجی‌های آن و نرم افزارهای Surfer، Tecplot، Excel و

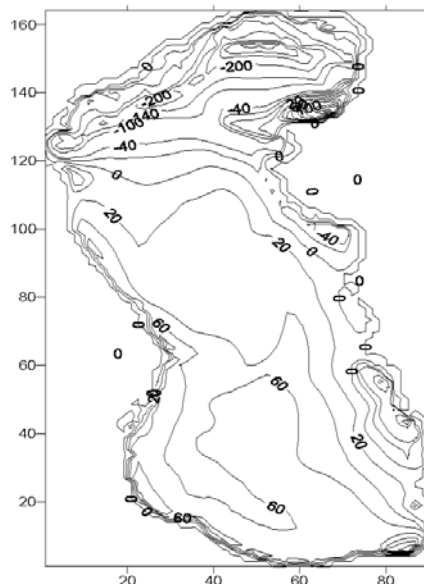
با  $0/0001$ ،  $0/0001$ ،  $0/1$ ،  $0/0$  و  $1$  را در نظر گرفته و حل نمودیم که برخی نمودارها و شکل‌های حاصل از آنها در اینجا ارائه گردیده است. همچنین مقایسه این حالتها و بررسی میزان حساسیت نتایج شبیه سازی نسبت به تغییر پارامترهای سرعت باد، جهت باد، ضریب اصطکاک کف و ضریب اصطکاک جانبی در اینجا ارائه گردیده است.



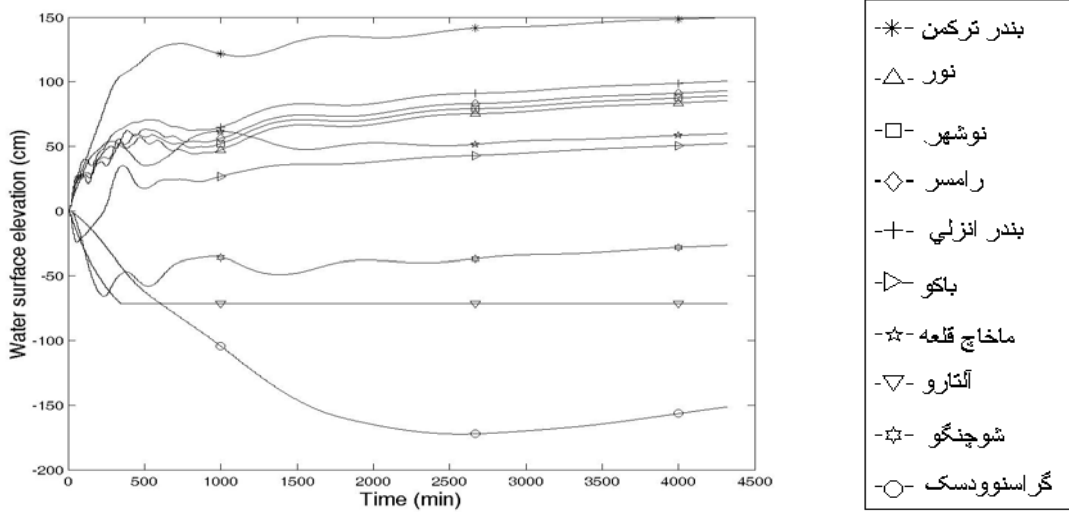
شکل ۵- الگوی جریان آب در اثر باد  $20 \text{ m/s}$  شمالی با  $f_d = 0.03$  و  $\epsilon = 0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان

شمال، شمال شرقی و شمال غربی و با سرعت‌های  $15 \text{ m/s}$ ،  $20 \text{ m/s}$  و  $25 \text{ m/s}$  در طول مدت وزش ۷۲ ساعت (سه شبانه روز) در نظر گرفته‌ایم.

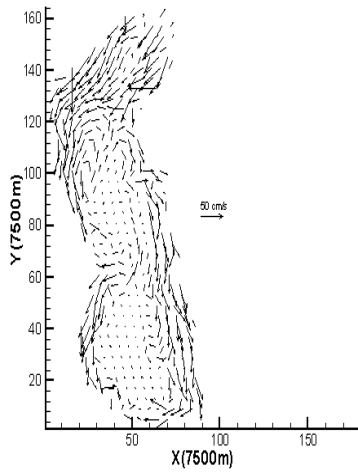
با توجه به اینکه ضریب اصطکاک کف ( $f_d$ ) و ضریب اصطکاک پهلوها ( $\epsilon$ ) در دریای خزر به طور دقیق اندازه‌گیری نشده است، ما در این تحقیق تمام حالت‌های ممکن با ضریب اصطکاک کف برابر با  $0/01$ ،  $0/015$ ،  $0/02$ ،  $0/03$  و  $0/04$  و حالت‌های با ضریب اصطکاک پهلوهای برابر



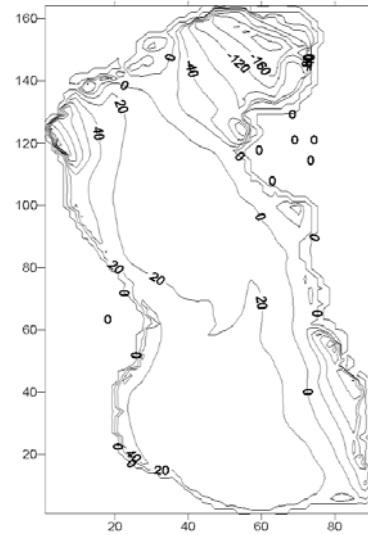
شکل ۴- خطوط هم ارتفاع آب در اثر باد  $20 \text{ m/s}$  شمالی با  $f_d = 0.03$  و  $\epsilon = 0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان



منحنی ارتفاع آب در ده منطقه رکورد گیری در اثر باد ۲۰ m/s شمالی با  $f_d=0.03$  و  $\varepsilon=0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان

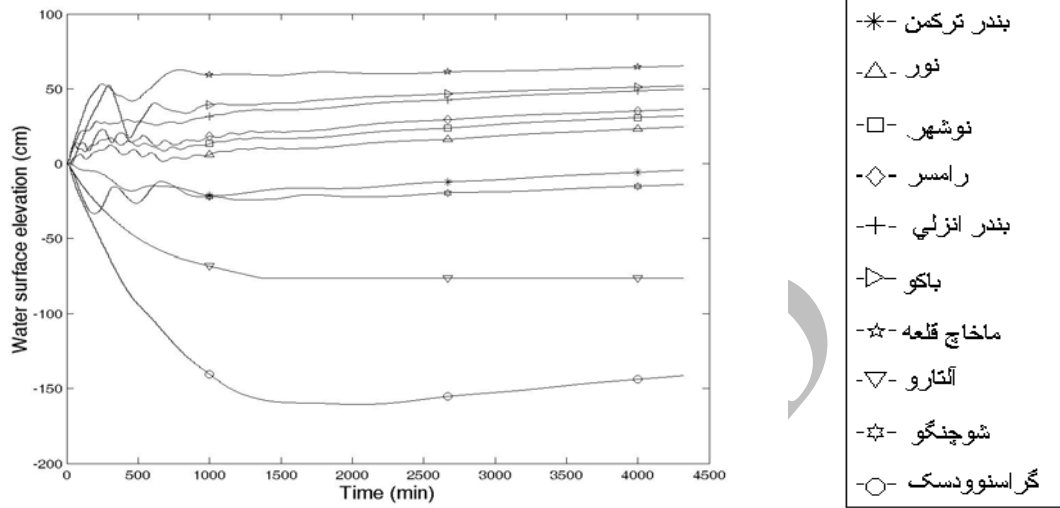


الگوی جریان آب در اثر باد ۱۵ m/s شمال شرقی با  $f_d=0.03$  و  $\varepsilon=0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان

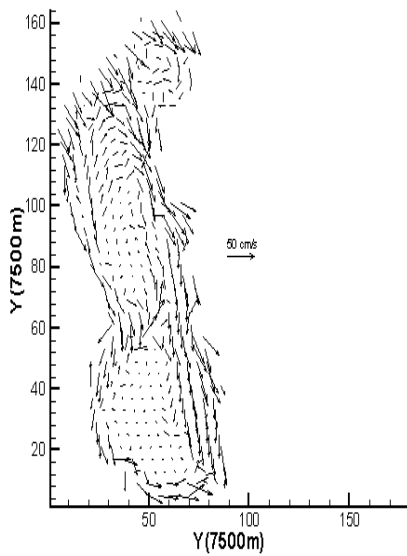


خطوط هم ارتفاع آب در اثر باد ۱۵ m/s شمال شرقی با  $f_d=0.03$  و  $\varepsilon=0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع

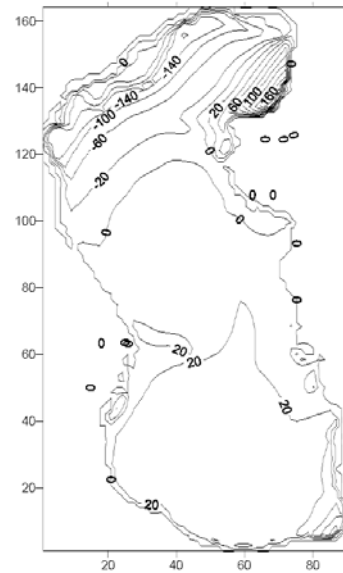




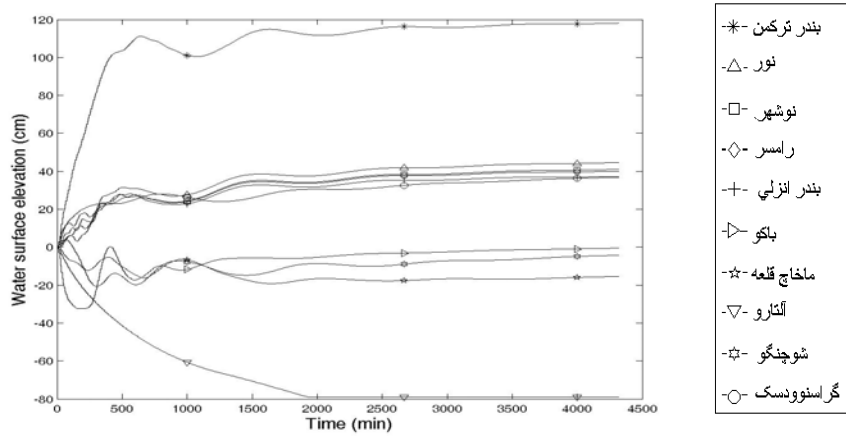
منحنی ارتفاع آب در ده منطقه رکورد گیری در اثر باد ۱۵ m/s شمال شرقی با  $f_d=0.03$  و  $\epsilon=0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان



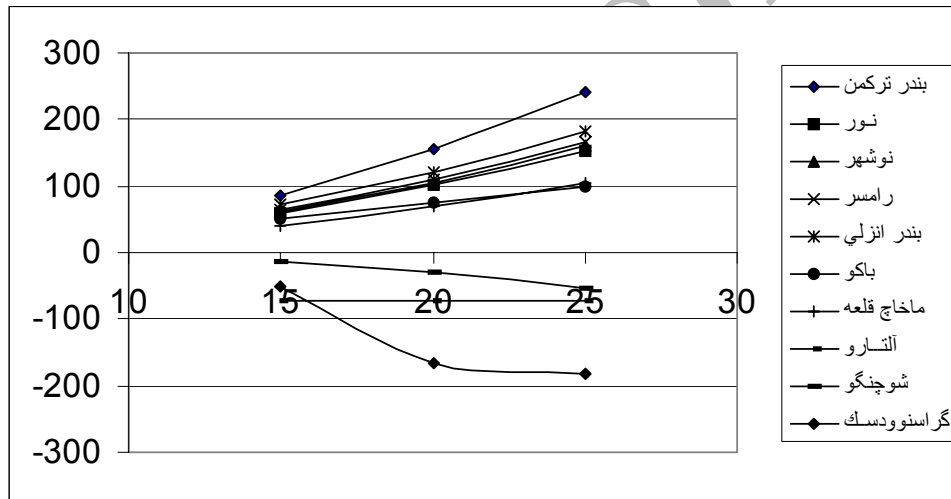
الگوی جریان آب در اثر باد ۱۵ m/s شمال غربی با  $f_d=0.04$  و  $\epsilon=0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان



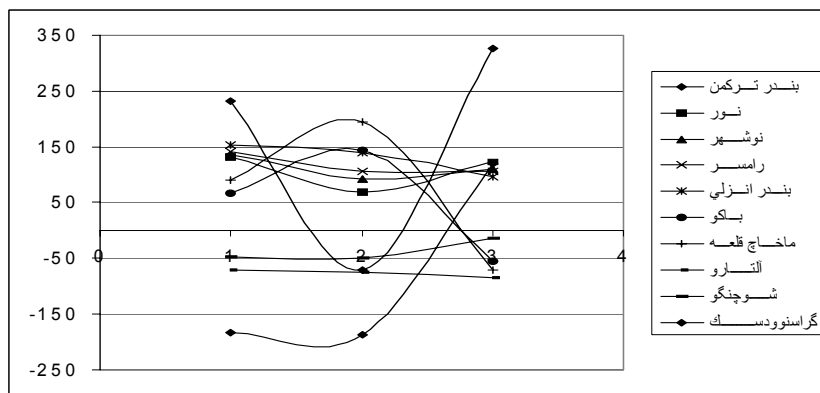
خطوط هم ارتفاع آب در اثر باد ۱۵ m/s شمال غربی با  $f_d=0.04$  و  $\epsilon=0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان



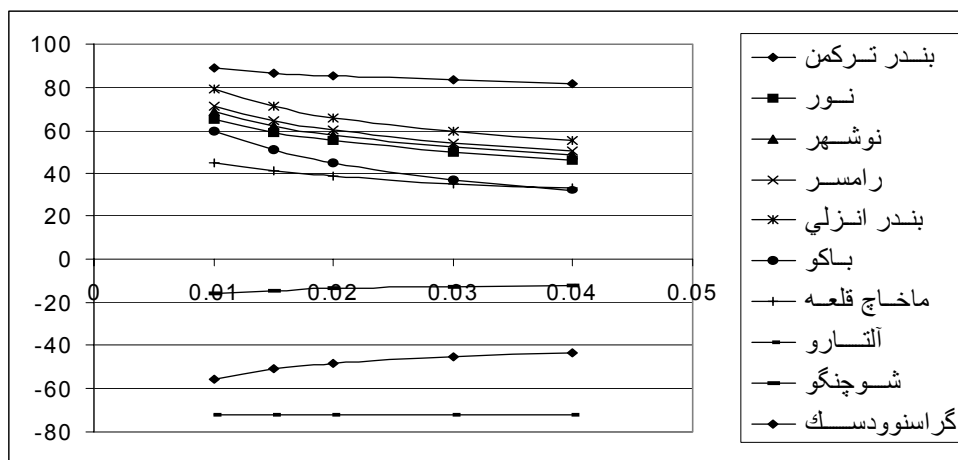
منحنی ارتفاع آب در ده منطقه رکوردگیری در اثر باد ۱۵ m/s شمال غربی با  $f_d = 0.04$  و  $\varepsilon = 0$  پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان



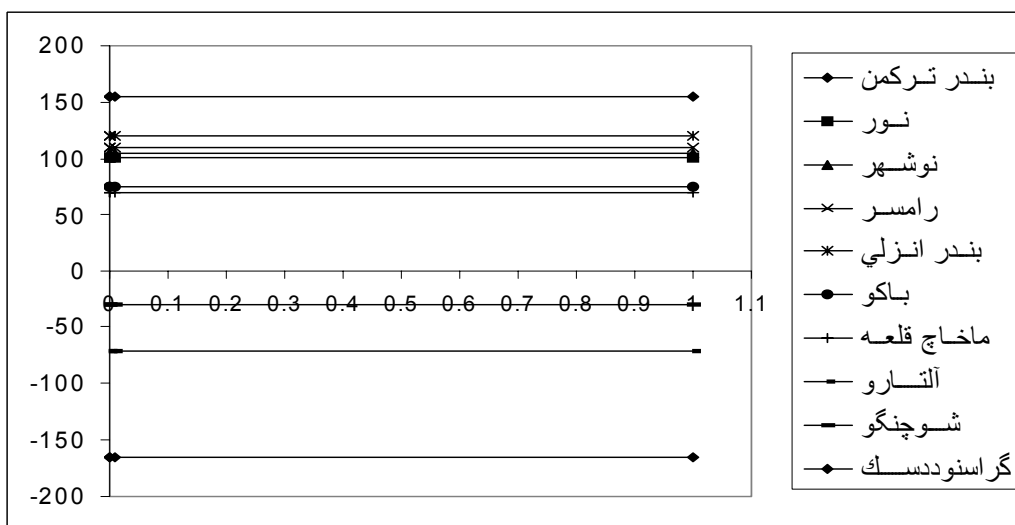
میزان ارتفاع آب برحسب سانتیمتر در ده منطقه رکوردگیری برای باد شمالی با ضریب اصطکاک کف ۰/۰۱۵ و ضریب اصطکاک جانبی صفر با سه سرعت باد ۱۵ m/s و ۲۰ m/s و ۲۵ m/s پس از ۷۲ ساعت از شروع توفان



میزان ارتفاع آب برحسب سانتیمتر در ده منطقه رکوردگیری برای باد با سرعت ۲۵ m/s و ضریب اصطکاک کف



میزان ارتفاع آب برحسب سانتیمتر در ده منطقه رکوردگیری برای باد ۱۵m/s شمالی و ضریب اصطکاک جانبی صفر با پنج ضریب اصطکاک کف ۰/۰۱ و ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲ و ۰/۰۳ و ۰/۰۴ پس از ۷۲ ساعت



میزان ارتفاع آب برحسب سانتیمتر در ده منطقه رکوردگیری برای باد ۲۰ m/s شمالی و ضریب اصطکاک کف ۰/۰۱۵ و با چهار ضریب اصطکاک جانبی ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۱ و ۰/۰ و ۱ پس از ۷۲ ساعت

دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، سازمان هواشناسی کشوری، منابع آب وزارت نیرو و شرکت سازه پردازی .

- 1- Ryabinin, Vladimir E., Oleg I. Zilberstein and W. Sheifert, 1996. Storm surges. Report No. 33, WMO/TD – No. p.799.
- 2- Williams Arthur E., 1986. Engineering and design storm surge analysis and design water level determinations. EM 1110-2-1412. Dep. of the army, U.S. Army corps of engineers, Washington D.C.
- 3- El-Sabh M.I., Murty T.S., 1989. Storm surges in the Arabian gulf. Natural Hazards, 1, pp. 371-385.
- 4- Nihoul Jacques C.J., 1977. Three-dimensional model of tides and storm surges in a shallow well-mixed continental sea. Dyn. Atmos. Oceans, 2: pp.29-47.
- 5- Wu, Jin, 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. J. Geophys. Res., 87(C12): pp. 9704 -9706.
- 6- Yan, Y., 1987. Numerical modeling of current and wave interactions of an inlet-beach system. Ph.D. Diss., Univ. Florida, Florida.
- 7- Wang, J.D., Connor, J.J., 1975. Mathematical modeling of near coastal circulation. Parsons Lab., Dep. Civil Eng., MIT, Cambridge, Mass., Pep. p.200.
- 8- Lynch, D.R., Gray, W.G., 1978. Analytic solutions for computer flow model testing. J. Hydraul. Div., ASCE, 104(Hy10):pp. 1409-1428.

با توجه به نمودار ۴ همانگونه که انتظار می رفت، تغییر سرعت باد دارای تاثیر مستقیم بر روی ارتفاع مد توفان بوده و همچنین جزء مهمترین کمیت‌های موثر بر میزان ارتفاع مد توفان می باشد. لذا باید سرعت باد منطقه با دقت بسیار اندازه‌گیری و جمع آوری شود تا بتوان از آنها برای اجرای مدل و شبیه سازی مد توفان با دقت بالا در منطقه استفاده نمود

با توجه به نمودار ۵ میزان حساسیت مدل به جهت باد به وضوح نشان داده شده می‌شود و همچنین مشخص می‌گردد که جهت باد نیز یکی از مهمترین پارامترهای موثر در میزان ارتفاع مد توفان می‌باشد. لذا برای کارهای با دقت بالا باید اندازه جهت باد به صورت خیلی دقیق محاسبه گردد.

با توجه به نمودار ۶ مشخص می‌گردد که تغییرات ضریب اصطکاک کف یکی از پارامترهای مهم در ارتفاع مد توفان می‌باشد و از آنجایی که بدست آوردن آن به روشهای تجربی کاری بس دشوار است، از این ضریب اغلب برای کالیبره کردن مدل استفاده می‌نمایند.

با توجه به نمودار ۷ مشاهده می‌گردد که در حوزه های آبی بزرگ تغییرات ضریب اصطکاک جانبی تأثیر چندانی بر میزان ارتفاع مد توفان ندارد. اما این پارامتر در حوزه های آبی کوچک و با شکل مرز پیچیده اهمیت پیدا می‌کند. همچنین میزان تأثیر تغییرات چگالی بر نتایج مدل بررسی شد و در نتیجه آن مشخص گردید که تغییرات چگالی تأثیر چندانی بر نتایج مدل ندارد.

با تشکر فراوان از آقایان دکتر دولتشاهی، دکتر شفیعی فر، دکتر صالحی نیشابوری، دکتر حیدری نژاد و خانم مهندس ناهید و آقایان پروفیسور Jerome P.-Y. Maa و T.S. Murty