

بررسی مدل سه‌بعدی جریان آب در حوضه جنوب‌شرق دریای خزر تحت تأثیر الگوی

باد متغیر با استفاده از نرم‌افزار مایک ۳

سورنا نسیمی^۱، سعید شربتی^۲ و سمیه‌سادات حسینی^۳

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان، ^۲دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۳کارشناس ریاضی کاربردی

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۶

چکیده

در این مطالعه مدل‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان در حوضه جنوب‌شرق دریای خزر با استفاده از نرم‌افزار مایک ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور اعمال شرایط مرزی در مرزهای باز غربی و شمالی حوضه به‌دست آمده از نتایج مدل دوبعدی مایک ۲۱ در دریای خزر شامل مؤلفه‌های سرعت و نوسانات سطح آب استفاده شده است. در اجرای مدل مایک ۲۱ از داده‌های باد به‌دست آمده از مدل عددی جوی سایت نوآ با دقت ۲/۵ درجه و به‌صورت متغیر در مکان و زمان به همراه اثرات ورودی رودهای مهم به دریای خزر (ولگا، ترک، سفیدرود، اورال و کورا)، اصطکاک بستر، تبخیر، نیروی کوریولیس و خروج آب از طریق خلیج قره‌بازگل در نظر گرفته شده است. ابعاد حوضه حل جنوب‌شرق دریای خزر ۶۰×۹۰ شبکه مربعی به اضلاع ۱۰۰۰ متر و در ۱۷ لایه عمودی می‌باشد. در اجرای مدل مایک ۳ برای اعمال اثر باد از داده‌های ایستگاه همدیده‌ای بندرترکمن پس از تبدیل به باد دور از ساحل به همراه ورودی رودهای مهم (اترک و گرگان‌رود)، تبادل آب با خلیج گرگان، اصطکاک بستر، تبخیر و نیروی کوریولیس استفاده گردیده است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل، خروجی‌های مدل با داده‌های میدانی مقایسه گردید که این نتایج بیانگر توانایی و دقت مدل مایک ۳ در شبیه‌سازی جریان‌ات دریایی می‌باشد. الگوی جریان به‌دست آمده از مدل بیانگر وجود جریان‌ات موازی با ساحل در کرانه ساحلی و دو حلقه جریان در لایه میانی است. با حرکت به سمت اعماق جریان‌ات با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نسبت به جریان‌ات سطحی از حوضه حل خارج می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی سه‌بعدی جریان، مایک ۳، حوضه جنوب‌شرق دریای خزر

مقدمه

جریان‌ات دریایی از جمله عوامل تأثیرگذار بر تولیدات اولیه زیستی در احجام آبی محسوب می‌گردد، چرا که جریان‌ات در تأمین مواد مغذی نقش به‌سزایی داشته و به این صورت با افزایش تولیدات اولیه سبب افزایش تولیدات ثانویه، صید و استفاده از منابع زیستی در دریا می‌گردد. از طرف دیگر جریان‌ات مهم‌ترین عامل در پراکنش آلودگی‌های زیست‌محیطی

بوده و از عوامل عمده در تغییر شکل رخساره نواحی ساحلی از طریق حمل مواد رسوبی می‌باشد. ساخت سازه‌های دریایی و دیگر پروژه‌های مهندسی نیز نیازمند اطلاعات کافی از الگوی جریان‌ات دریایی می‌باشد. امروزه بهره‌جستن از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی فرایندهای دریایی هم‌چون جریان، رسوب، موج، نوسانات سطح آب و پخش آلودگی‌های زیست‌محیطی امری بدیهی می‌باشد، چرا که مدل‌های عددی سبب کاهش چشم‌گیری در هزینه‌های مالی و زمانی شده و قابلیت تغییر ضرایب و بهبودی کاربری

*مسئول مکاتبه: s_sharbaty@yahoo.com

Lednev (۱۹۴۳) اشاره نمود. تا زمان نگارش این مقاله هیچ‌گونه پژوهشی در ارتباط با به‌کارگیری مدل سه‌بعدی جریان مایک ۳ در دریای خزر و حوضه‌های اطراف آن صورت نپذیرفته است. حوضه جنوب‌شرقی دریای خزر با شیب کم‌تر از ۰/۵ درجه دارای حداکثر عمق ۳۴ و متوسط عمق ۸ متر بوده و با طول ۶۰ و عرض ۹۰ کیلومتر تماماً در منطقه فلات قاره واقع شده است. این بخش از دریا از غرب به آب‌های استان مازندران، از جنوب غرب به شهرستان بهشهر، از شرق و جنوب شرق به سواحل استان گلستان و از شمال شرقی به جمهوری ترکمنستان ختم می‌گردد. وسعت این منطقه بالغ بر ۵۴۰۰ کیلومترمربع و رسوبات بستر آن منشاء دریایی و قاره‌ای دارند. سیمای عمومی سواحل این حوضه هموار و مسطح بوده و از مخروطه‌افکن‌های قدیمی و جوان دلتای گرگان‌رود و دریاچه‌های سواحل پست خزری تشکیل شده است (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۰). هدف از انجام این پژوهش بررسی نتایج به‌دست آمده از مدل جریان مایک ۳ در حوضه جنوب شرق دریای خزر به‌منظور دستیابی به الگوی جریان و مؤلفه‌های سرعت (u,v,w) به‌صورت سه‌بعدی و در لایه‌های مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای، استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده توسط وزارت نیرو، داده‌های مدل عددی جوی سایت نوآ و اجرای دو مدل ریاضی مایک ۲۱ و مایک ۳ می‌باشد.

اجرای مدل ریاضی: در این بخش از پژوهش به تشریح اجرای دو مدل ریاضی مایک ۲۱ و مایک ۳ پرداخته می‌شود. به‌دلیل نبود داده‌های میدانی جریان و نوسانات سطح آب در مرزهای باز منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی طرح (۲۰۰۱/۰۷/۲۸ تا ۲۰۰۱/۰۸/۲۸)، در ابتدا نسبت به مدل‌سازی دوبعدی جریان در دریای

پارامترهای موجود در معادلات توصیف‌کننده فرایند مورد نظر را دارند. در سال‌های اخیر مدل سه‌بعدی مایک ۳ و دوبعدی مایک ۲۱ (توسعه‌یافته توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک) از جایگاه ویژه‌ای نزد کشورهای صاحب دریا برخوردار گردیده است. در این پژوهش الگوی سه‌بعدی جریان ناشی از باد در حوضه جنوب شرق دریای خزر مورد بررسی قرار گرفته است. از نظر بوم‌شناختی این بخش از دریای خزر به‌دلیل داشتن عمق کم و دمای مناسب محل مناسبی برای زندگی آبزیان دریایی به‌خصوص ماهیان خاویاری است، به‌گونه‌ای که ۴۶ درصد از سهم استحصال منابع خاویاری ایران از این حوضه تامین می‌گردد. از طرفی بوم‌سازگان‌های مهمی هم‌چون تالاب گمیشان، خلیج گرگان و شبه‌جزیره میانکاله به‌دلیل هم‌جواری با آن بیش‌ترین تأثیرپذیری را از این حوضه دارند. توسعه مزارع وسیع پرورش ماهی و میگو در سواحل حوضه جنوب شرقی دریای خزر به همراه شهرک‌های صنعتی هم‌جوار با آن و طرح‌های عمرانی مهم هم‌چون احداث بندر ترکمن، گز و خواجه‌نفس و آورد آلودگی‌های شهری توسط دو رود مهم گرگان‌رود و اترک سبب بروز آلودگی‌های محیط زیستی متعدد در این حوضه می‌گردد. در خصوص مطالعات هیدرودینامیک جریان در دریای خزر و حوضه‌های اطراف آن می‌توان به پژوهش‌های Zounemat-Kermani و Sabbagh-Yazdi (۲۰۱۰)، Ibrayev و همکاران (۲۰۰۹)، Ghaffari و Chegini (۲۰۰۹)، Esmaili (۲۰۰۹)، Knysh و همکاران (۲۰۰۸a)، Knysh و همکاران (۲۰۰۸b)، Nasimi و Ghiasi (۲۰۰۶)، وفائیان (۱۳۸۵)، Korotenko و همکاران (۲۰۰۲)، Korotenko و همکاران (۲۰۰۴)، Panin و همکاران (۲۰۰۳)، Bannazadeh و همکاران (۲۰۰۲)، Sabbagh-Yazdi (۲۰۰۲)، Matthew و همکاران (۲۰۰۱)، شعبانی (۱۳۷۳)،

جهت‌های x و y می‌باشند. c : ضریب مقاومت شزی (یک بر مترمربع در ثانیه)، g : شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)، f : ضریب اصطکاک باد، v_x ، v_y : سرعت باد و مؤلفه‌های آن در دو جهت x و y ، w : پارامتر کوریولیس که به عرض جغرافیایی وابسته است (یک بر ثانیه)، p_a : فشار اتمسفر (کیلوگرم بر متر بر مجذور ثانیه)، ρ_w : چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، x و y : مؤلفه‌های مختصات (متر)، t : زمان (ثانیه)، τ_{xx} ، τ_{xy} و τ_{yy} : مؤلفه‌های تنش برشی مؤثر می‌باشند. نقشه عمق‌سنجی مهم‌ترین ورودی به تمامی مدل‌های هیدرودینامیکی است، چرا که در صورت نبود دقت کافی در مدل‌سازی مرزهای هندسی و هیدروگراف حوضه حل مدل قادر به شبیه‌سازی صحیح از پدیده موردنظر نخواهد بود. برای ساخت نقشه عمق‌سنجی دریای خزر که تراز مبنای آن برابر با ۲۸- متر نسبت به سطح دریای بالتیک می‌باشد، از نقشه کاغذی دریای خزر به مقیاس ۱:۱۵۰۰۰۰۰ تهیه شده با سیستم نقشه‌برداری جهانی ۱۹۸۴ استفاده گردید (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۸). ابعاد نقشه عمق‌سنجی دریای خزر شامل ۶۳×۱۱۷ شبکه مربعی منظم به ضلع ۱۰ کیلومتر و در سیستم مختصات کارتزین می‌باشد. با توجه به این‌که حداکثر عمق موجود در حوضه جنوب‌شرق دریای خزر برابر ۳۴- متر می‌باشد، بنابراین در مدل‌سازی هندسه بستر، تمامی اعماق بیش از مقدار بالا معادل ۳۴- متر در نظر گرفته شد. برای اعمال نیروی باد به‌صورت متغیر در مکان و زمان به‌عنوان مهم‌ترین عامل در شکل‌دهی جریان‌ات سطحی حوضه دریای خزر از خروجی داده‌های تحلیلی مدل عددی جوی سایت نوا^۳ با دقت ۲/۵ درجه شامل مؤلفه‌های سرعت باد و فشار در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا با فواصل زمانی ۶ ساعته در شبکه‌های مربعی منظم به ابعاد ۶۳×۱۱۷ و به اضلاع ۱۰۰۰۰ متر

خزر با استفاده از مدل مایک ۲۱ اقدام گردید. مدل مایک ۲۱ معادلات پایستگی جرم و اندازه حرکت را به روش تفاضل محدود گسسته‌سازی نموده و با انتگرال‌گیری در عمق به شیوه روش ضمنی با جهت متغیر^۱، مؤلفه‌های میانگین‌گیری شده سرعت (\bar{u}, \bar{v}) و تراز سطح آب را به‌دست می‌آورد. مدل هیدرودینامیک مایک ۲۱ قادر است مجموعه عواملی را مانند، اصطکاک بستر، تنش باد، شرایط مرزی نوسانات سطح آب و جریان، لزجت گردابه‌ای، خشکی و تری، اثر تابش امواج، اثر ورودی رودخانه‌ها، بارش و تبخیر را شبیه‌سازی نماید (Bannazadeh و همکاران، ۲۰۰۲). معادلات پایستگی و اندازه حرکت به‌کار گرفته شده در مدل مایک ۲۱ به قرار زیر می‌باشند.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

معادله اندازه حرکت در جهت x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q \\ - fvv_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned}$$

معادله اندازه حرکت در جهت y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p \\ - fvv_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned}$$

در معادله‌های بالا، h : عمق آب (متر)، ξ : تراز سطح آب (متر)، p و q : دبی در واحد عرض در جهت‌های x و y بر حسب (مترمکعب بر کیلوگرم در ثانیه) که معادل uh و vh هستند که u و v مقادیر سرعت در

2- World Geodetic System of 1984

3- NOAA

1- Alternating Direction Implicit

سرعت باد و متغیرهای f_1 و f_2 بیانگر ضرایب اصطکاک باد در سطح دریا می‌باشند. علاوه بر موارد یاد شده در اجرای مدل مایک ۲۱ از دبی ورودی ۵ رود بزرگ به دریا (ولگا، اورال، ترک، کورا و سفیدرود) به‌عنوان چشمه و خروجی آب از خلیج قره‌بازگل و تبخیر به‌عنوان چاه و اثر نیروی کوریولیس و شرایط اولیه نوسانات سطح آب برداشت شده از داده‌های ارتفاع‌سنجی سایت نوآ استفاده شده است. جدول ۱ مجموعه عوامل در نظر گرفته شده در اجرای مدل مایک ۲۱ را به‌طور خلاصه بیان می‌نماید.

استفاده گردید (Korotenko و همکاران، ۲۰۰۲). برای اعمال تغییرات ضرایب اصطکاک باد در سطح دریا به همراه تغییرات سرعت باد از رابطه اسمیت و بنک (۲۰۰۷) استفاده شد.

$$f(v) = \begin{cases} f_1 & \text{for } v < v_1 \\ f_1 + \frac{v - v_1}{v_2 - v_1}(f_2 - f_1) & \text{for } v_1 \leq v \leq v_2 \\ f_2 & \text{for } v > v_2 \end{cases}$$

$$f_1 = 0.0026, \quad v_1 = 3.0 \frac{m}{s}$$

$$f_2 = 0.0063, \quad v_2 = 0 \frac{m}{s}$$

در رابطه‌های بالا متغیرهای v ، v_1 و v_2 بیانگر

جدول ۱- مجموعه عوامل در نظر گرفته شده در مدل مایک ۲۱

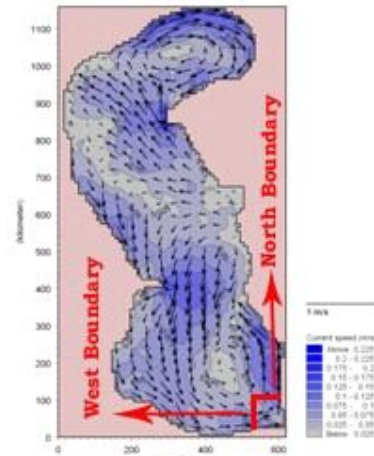
Module Selection	Hydrodynamic	Simulation Start Date	۲۰۰۱/۰۷/۰۲
Map Projection	WGS-1984-UTM-Zone-38N	Simulation End Date	۲۰۰۱/۰۸/۰۲
Time Step Range	۴۴۶۴	Max Courant Number	۱/۰۹
Time Step Interval	۶۰۰ ثانیه	Number of sources	۵
Flooding & Drying Depth	۰/۳ و ۰/۲ متر	Number of sink	۱
Initial Surface Elevation	NOAA Data-Dfs2file	Evaporation	۶
Precipitation	۰	Eddy Viscosity (Smagorinsky Velocity Based)	۰/۵
Resistance (Manning Number)	۳۲	Wind Conditions	Varying in Space & Time

نرم‌افزار مایک ۳ در هر کجا که شبیه‌سازی هیدرودینامیک و پدیده‌های مرتبط با آن در نواحی ساحلی و در دریاها که در آن لایه‌بندی و یا گردش عمودی مهم می‌باشد قابل به‌کارگیری است. مدل مایک ۳ برای انتگرال‌گیری از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت متغیر در زمان و مکان از شیوه روش ضمنی با جهت متغیر استفاده می‌کند. آرایه‌های معادلات در هر شبکه خطی و در هر جهت با الگوریتم جاروب دوطرفه^۱ حل می‌گردند. در طرح پیش‌رو به‌دلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات میدانی شوری و دما در بازه زمانی حل از اثر این عوامل در ایجاد جریان صرف‌نظر شده است.

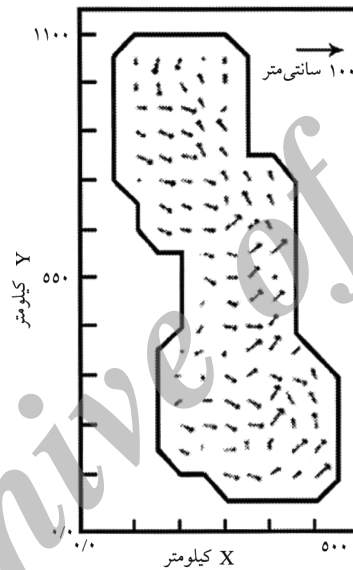
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از مدل، نسبت به مقایسه الگوی جریان به‌دست آمده با گزارش‌های درج شده در منابع مستدل اقدام گردیده است (شکل‌های ۱، ۲ و ۳). در مرحله بعد نسبت به استخراج مؤلفه‌های سرعت میانگین‌گیری شده (\bar{u}, \bar{v}) و نوسانات سطح آب به‌صورت دو پروفیل عرضی در دو مرز باز غربی و شمالی اقدام گردید (شکل ۱).

اجرای مدل هیدرودینامیک مایک ۳ مدل هیدرودینامیک استفاده شده در این مطالعه برای شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان در حوضه جنوب‌شرق دریای خزر، مدل سه‌بعدی مایک ۳ است که دربرگیرنده سیستم مدل‌سازی جامعی برای جریانات سه‌بعدی با سطح آزاد می‌باشد.

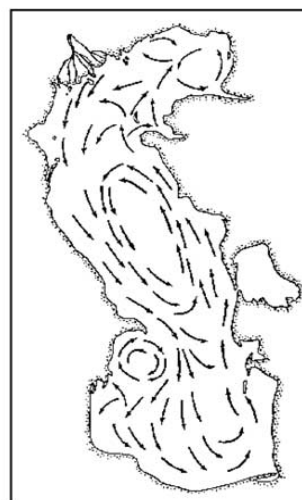
1- Double Sweep Algorithm



شکل ۱- الگوی دوبعدی جریانات در دریای خزر توسط مدل مایک ۲۱ به همراه موقعیت مرزهای باز غربی و شمالی



شکل ۲- جریان‌های اصلی در سطح دریای خزر به دست آمده از مدل عددی در حالت پایا توسط بنزاده (۲۰۰۲)



شکل ۳- نمونه‌ای از نحوه گردش عمومی آب در دریای خزر، اقتباس از لدینو (۱۹۴۳)

به صورت لایه‌های ۰/۵ متری انتخاب گردید و پس از بارها اجرای مدل، نسبت به واسنجی مدل اقدام نموده و به این صورت با به دست آوردن ضرایب کالیبراسیون، بهترین نتایج ممکن استحصال گردید. در مرحله بعد با توجه به این که حوضه حل دارای حداکثر عمق ۳۴ متر می‌باشد، بنابراین فاصله‌های بین شبکه‌ای در امتداد قائم برابر ۲ متر انتخاب شد. به این صورت حوضه حل از ۱۷ لایه مجزا تشکیل گردید. برای حل معادلات حاکم بر جریان، هم چون تمامی معادلات دیفرانسیل دیگر نیازمند شرایط مرزی می‌باشیم. در این پژوهش برای اعمال شرایط مرزی اولیه از داده‌های خروجی به دست آمده از اجرای مدل مایک ۲۱ در دریای خزر شامل مؤلفه‌های سرعت و نوسانات سطح آب در دو مرز باز مدل واقع در غرب و شمال حوضه حل استفاده شده است. در بازه زمانی طرح (۲۰۰۱/۰۷/۲۰ تا ۲۰۰۱/۰۸/۲۰) از داده‌های ایستگاه همدیده‌ای شهرستان بندرترکمن شامل سرعت و جهت باد استفاده شده است. از آنجایی که ایستگاه بالا در خشکی واقع می‌باشد و از نظر ارتفاع و سرعت با باد موجود در سطح دریا فرق دارد، بنابراین از روش‌های تصحیحاتی برای تبدیل باد ساحلی به باد دور از ساحل استفاده گردید (Zounemat-Kermani و Sabbagh-Yazdi, ۲۰۱۰). به منظور اعمال تغییرات ضرایب اصطکاک باد در سطح دریا به همراه سرعت باد از رابطه اسمیت و بنک (۲۰۰۷) استفاده گردید. با توجه به کم عمق بودن حوضه حل، مقاومت برشی بستر به عنوان عامل تأثیرگذار بر جریانات بر حسب فرمول ضریب درگ مطابق رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\tau_{bottom}}{\rho} = C_D u^* |u^*|$$

در رابطه بالا، τ_{bottom} : بیانگر تنش برشی بستر، ρ : چگالی آب، C_D : ضریب درگ و u^* : بیانگر سرعت محاسبه شده در سطح بالای بستر می‌باشد. در این مطالعه در مدل‌سازی اغتشاش از فرمول اختلاطی

معادله‌های به کار گرفته شده در مدل مایک ۳ به قرار زیر می‌باشد:

معادله پیوستگی جرم:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = SS$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + \nu \Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + u_i SS$$

معادله شوری:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (S u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + SS$$

معادله دما:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + SS$$

در معادله‌های بالا، ρ : بیانگر چگالی سیال، C : سرعت صوت در آب دریا، u_i : سرعت در جهت x_i ، Ω_{ij} : تانسور نیروی کوریولیس، P : فشار سیال، g_i : بردار گرانش، ν_T : لزجت گردابه‌ای ناشی از تلاطم، δ : دلتا کرونکر، k : انرژی جنبشی تلاطمی، S و T : دما و شوری، D_S و D_T : ضرایب پخشودگی و t : بیانگر زمان می‌باشد. در معادله‌های بالا SS : بیانگر عبارات چشمه و چاه می‌باشد (Esmaili, ۲۰۰۹). به منظور مدل‌سازی هندسه حوضه حل در بخش جنوب شرقی دریای خزر از نقشه آبنگاری با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده گردید (سازمان نقشه برداری کشور، ۱۳۷۸). ابعاد هندسه حوضه حل شامل 60×90 شبکه مربعی منظم به ضلع ۱۰۰۰ متر و در سیستم مختصات کارتزین می‌باشد. نخست به منظور صحت‌سنجی و با توجه به عمق اندازه‌گیری میدانی جریان، فاصله‌های بین شبکه‌ای در امتداد قائم

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right)$$

برای اعمال شرایط مرزی سطح آب در طرح پیش‌رو از نتایج مدل‌سازی دوبعدی دریای خزر استفاده شده است. منابع ورودی به حوضه حل شامل میانگین دبی ورودی رود اترک و گرگان‌رود است که به‌عنوان چشمه به مدل اعمال گردید. در منتهی‌الیه بخش جنوب‌شرقی دریای خزر خلیج گرگان واقع گردیده است این خلیج نقش به‌سزایی در تغییر الگوی جریانات در حوضه حل داشته و در این کار اثرات تبادلی دبی آب خلیج با دریای خزر در نظر گرفته شده است. برای انجام این امر از نتایج اجرای مدل مایک ۲۱ در خلیج گرگان استفاده گردید (شربت‌ی و همکاران، ۲۰۱۰). به‌منظور استحصال نتایج مناسب، مقادیر برخی از عوامل هم‌چون مقادیر اولیه متغیرها پس از چند بار اجرای مدل و واسنجی با داده‌های میدانی جریان به‌دست آمد. جدول ۲ مقادیر عوامل و متغیرهای به‌کار گرفته شده را در اجرای مدل مایک ۳ نشان می‌دهد.

$k-\varepsilon$ و اسماکورینسکی استفاده شده است. در این شیوه برای مدل‌سازی اغتشاش در صفحه افق از فرمول اسماکورینسکی و برای مدل‌سازی اغتشاش در جهت عمود از مدل یک‌بعدی $k-\varepsilon$ استفاده می‌گردد (Ibrayev و همکاران، ۲۰۰۹). در این شیوه لزجت گردابه‌ای به اندازه شبکه‌ها و آهنگ تغییر شکل گردابه‌های بزرگ یعنی گرادیان‌های میدان سرعت جریان حل شده مربوط می‌گردد. یعنی:

$$v_T = L^2 \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ji}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right)$$

در معادله‌های بالا، u_i : مؤلفه سرعت در جهت x_i و l : مقیاس طولی که با حاصل‌ضرب $C_{sm} \cdot \Delta s$ به‌دست می‌آید. در اینجا Δs : ابعاد شبکه‌ای و C_{sm} : پارامتر ثابتی است که مقدار آن با توجه به شرایط مدل تعیین می‌شود. در مدل $k-\varepsilon$ از معادلات انتقالی برای توصیف دو کمیت حرکت اغتشاشی یعنی ε و k که به‌ترتیب بیانگر انرژی جنبشی اغتشاشی و آهنگ پخشودگی انرژی جنبشی اغتشاشی است استفاده می‌گردد. عبارت کوموگرو پرانتدل، معادله‌های میانگین جریان را برای متغیرهای حالت مدل اغتشاشی جفت می‌نماید.

جدول ۲- عوامل و متغیرهای به‌کار گرفته شده در اجرای مدل مایک ۳

Module Selection	Hydrodynamic	Simulation Start Date	۲۰۰۱/۰۷/۲۰
Map Projection	WGS-1984-UTM-Zone-38N	Simulation End Date	۲۰۰۱/۰۸/۲۰
Time Step Range	۴۴۶۴	Max Courant Number	۱۰/۵۳
Time Step Interval	۶۰۰ ثانیه	Number of sources	۲
Flooding & Drying Depth	۰/۲ و ۰/۳ متر	Number of sink	۱
Initial Surface Elevation	From file Dfs2 of Mike21	Evaporation	۶
Precipitation	۰	Turbulence model	$k-\varepsilon$ Mixed/smagorinsky formula
Resistance (Manning Number)	۳۰	Wind Conditions	Varying in time & constant in space
Number of Vertical Layers	۱۷	Apply coriolis forcing	yes
Vertical grid spacing	۲ متر	Boundary condition	data transfer (Velocity-dfs1)
Background salinity	۱۳ psu	Background temperature	۲۷
Warm-Up	۳ روز	Number of computational points	۴۳۷۶۲۲
		Type of bathymetry	2D bathymetry

1- Kolmogorov-Prandtl

۲۰۰۷). برای ارزیابی نتایج به دست آمده، از رابطه خطای جذر متوسط مربعات برای مقایسه درصد خطا استفاده شده است (جدول ۳).

برای صحت سنجی مدل از داده های جریان سنجی اندازه گیری شده در سه عمق سطحی (۰/۲h)، میانی (۰/۶h) و عمقی (۰/۸h) توسط وزارت نیرو در بخش جنوبی حوضه حل استفاده گردید (Smith و Bank).

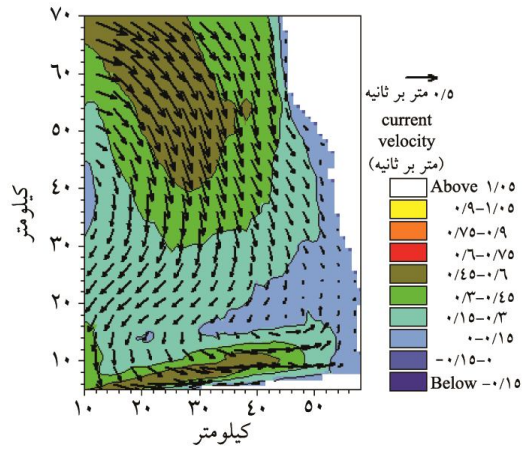
جدول ۳- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی و اندازه گیری میدانی در دو نقطه از حوضه حل

تاریخ	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عمق کل	عمق اندازه گیری	سرعت جریان	سرعت جریان به دست آمده از مدل	درصد خطا
۲۰۰۷/۰۸/۰۱	B _۱	۳۶ ۵۵ ۰	۵۴ ۰۲ ۱۸	۱/۹	۰/۴	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱
					۱/۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۹
					۱/۶	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۲
	B _۲	۳۶ ۵۵ ۰	۵۴ ۰۱ ۲۳	۲/۳	۰/۴	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۴
					۱/۴	۰/۲	۰/۲۱	۰/۰۵
					۱/۸	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۰۸

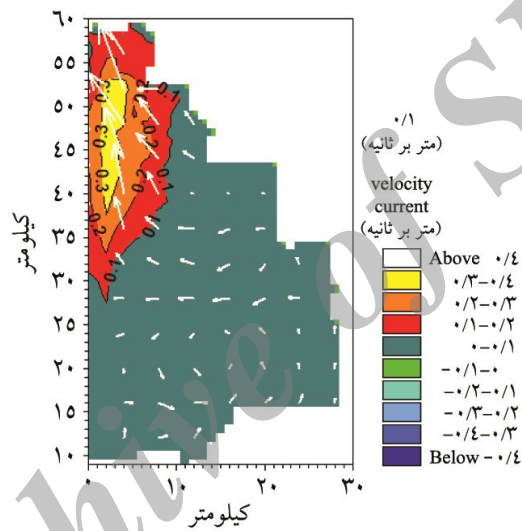
نتیجه گیری و بحث

در اجرای مدل مایک ۳ به منظور شبیه سازی الگوی جریان سه بعدی ناشی از وزش باد، داشتن اطلاعات مرزی مناسب در حوضه حل الزامی می باشد. حوضه حل دارای دو مرز باز در شمال و غرب می باشد. به منظور استخراج شرایط مرزهای باز شامل نوسانات سطح آب و مؤلفه های سرعت در صفحه از نتایج اجرای مدل مایک ۲۱ در دریای خزر استفاده شده است. مدل مایک ۳ پس از اعمال شرایط مرزی به همراه باد دور از ساحل به اجرا در آمده و نتایج به دست آمده از آن در دو نقطه از حوضه حل صحت سنجی گردید. لازم به ذکر است که مدل با گام های زمانی ۶۰۰ ثانیه و به مدت ۳۱ روز از تاریخ ۲۰۰۱/۷/۲۰ تا ۲۰۰۱/۸/۲۰ اجرا شده است. در این بخش از پژوهش، نتایج اجرای مدل ریاضی مایک ۳ در حوضه حل ارایه می گردد.

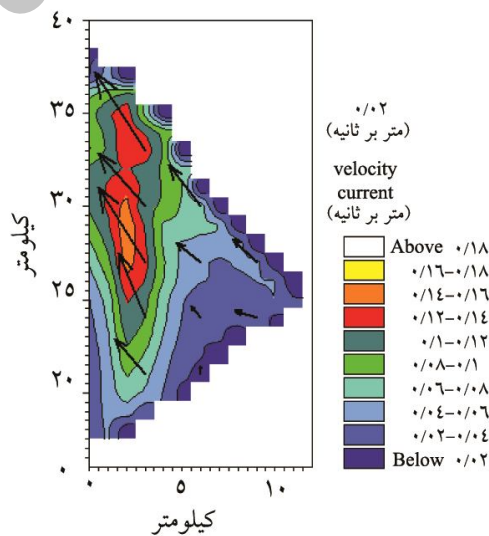
تشریح جریانات در مناطق ساحلی: به طور کلی در دوره زمانی طرح، جریانات ساحلی در امتداد سواحل و به صورت رفت و برگشتی می باشد. در بخش جنوبی و در بالای شبه جزیره میانکاله عموماً جریان در امتداد جزیره و از غرب به شرق می باشد (شکل ۴). حداکثر سرعت محاسبه شده توسط مدل در امتداد این سواحل معادل ۰/۴۵ متر بر ثانیه است. در بخش غربی سواحل با حرکت از سمت جنوب به شمال، میزان سرعت افزایش می یابد به طوری که جریانات ساحلی در شمال حوضه حل به بیشینه سرعت معادل ۰/۳ متر بر ثانیه می رسند. الگوی جریان در امتداد سواحل غربی از الگوی وزش باد پیروی کرده و در راستای آن از شمال به جنوب می باشد. با توجه به عمق کم نواحی ساحلی، به دلیل اصطکاک بستر و اثر ناشی از اصطکاک بین لایه ها سرعت جریانات سطحی به همراه افزایش عمق کاهش می یابد.



شکل ۴- نمایش الگوی جریان و توزیع سرعت در لایه سطحی پس از گذشت ۵ روز از اجرای مدل



شکل ۵- نمایش الگوی جریان و توزیع سرعت در لایه میانی (عمق ۱۷ متری) پس از گذشت ۵ روز از اجرای مدل



شکل ۶- نمایش الگوی جریان و توزیع سرعت در عمق ۲۸ متری پس از گذشت ۵ روز از اجرای مدل

تحت تأثیر جریانات سریع و پادساعت گرد دریای خزر می باشند. لایه میانی در بخش جنوبی کم تر تحت تأثیر الگوی وزش باد در سطح بوده و به دلیل نزدیکی به بستر، تحت تأثیر توپوگرافی دارای مقادیر سرعت کم می باشد. حداکثر سرعت جریان در این لایه معادل ۰/۱ متر بر ثانیه می باشد. همان طور که از شکل ۵ پیداست در بیش تر مواقع بخش جنوبی محل تشکیل حلقه پادساعت گرد و بخش شمالی محل تشکیل حلقه ساعت گرد جریان می باشد.

تشریح جریانات در لایه های عمیق: شکل ۶ بخش عمیق حوضه حل را در عمق ۲۸ متری نشان می دهد. عموماً جهت جریان در این نواحی به سمت شمال غربی می باشد به گونه ای که جهت جریان در این عمق ۱۸۰ درجه با جریانات سطحی که در بیش تر مواقع به سمت جنوب شرقی می باشد اختلاف فاز داشته و بیانگر خروج توده های آب در این اعماق به خارج از حوضه حل می باشد. حداکثر سرعت به دست آمده در این لایه توسط مدل معادل ۰/۱ متر بر ثانیه می باشد. دلیل وجود چنین سرعت های بالایی در اعماق می تواند اتصال ناگهانی فلات قاره به شیب قاره باشد که سبب تقویت حرکت توده آب به سمت پایین در شیب قاره می گردد.

به منظور بررسی لایه سطحی در نواحی دور از ساحل، حوضه جنوب شرق دریای خزر به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم گردید. در لایه سطحی بخش شمالی، جریانات به طور عمده در امتداد باد غالب شمال غربی و به سمت جنوب شرقی می باشند. با نزدیک شدن به بخش جنوبی جریانات بیش تر تحت تأثیر توپوگرافی بستر قرار گرفته و با تغییر جهت دادن در بیش تر مواقع در خلال دوره در جهت جنوب به حرکت در می آیند. حداکثر سرعت به دست آمده توسط مدل در این نواحی بالغ بر ۰/۴۵ متر بر ثانیه است.

تشریح جریانات در لایه میانی: بررسی جریانات در لایه میانی حوضه حل و در عمق ۱۷ متری بیانگر میزان تأثیرپذیری بالای این لایه از لایه سطحی است که متأثر از کنش باد می باشد. از طرفی توپوگرافی بستر نیز به عنوان عامل دوم در شکل دهی چرخه جریان در این لایه نقش به سزایی دارد. در بیش تر مواقع در بخش شمالی حوضه حل جریانات میانی به سمت شمال و شمال غرب منحرف شده اند و حداکثر سرعت ثبت شده در این لایه مربوط به بخش عمیق آن و معادل ۰/۳ متر بر ثانیه می باشد. دلیل وجود چنین سرعت های بالایی در این لایه می تواند به دلیل سرعت های بالا در مرز باز غربی باشد که خود

منابع

- ۱- سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۷۰. فرهنگ چینه شناسی ایران، گزارش شماره ۱۸، وزارت معادن و فلزات.
- ۲- سازمان نقشه برداری کشور، ۱۳۷۸. نقشه هیدروگرافی ۱:۱۰۰۰۰۰، شیت بندر ترکمن - به شهر.
- ۳- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۸. نقشه هیدروگرافی ۱:۱۵۰۰۰۰۰، شیت دریای خزر.
- ۴- شعبانی، ع.، ۱۳۷۳. بررسی جریان آب ناشی از باد در دریای خزر (مدل دوی بعدی با باد ثابت). پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال. صفحه ۲۲-۶۴.
- ۵- وفائیان، ف.، ۱۳۸۵. مطالعه جریان چگال ورودی به حوضه خزر جنوبی با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی اقیانوسی با مختصات سیگما. پایان نامه دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات. صفحه ۴۱-۶۰.

6. Bannazadeh, M.R., Bidokhti, A.A., Kherandish, M., and Hosseini, H.F., 2002. A Three-Dimensional Model of the Caspian Sea. J. Esteghlal. 21 (1), 207-220.

7. Esmaeili, M., 2009. Long shore Currents Simulation using Mike 21 Numerical Model. *Earth and Space Physics J.* 35 (2), 139-156.
8. Ghaffari, P., and Chegini, V., 2009. Acoustic Doppler Current Profiler Observations in the southern Caspian Sea: shelf currents and flow field off Freidoonkenar Bay, Iran *Ocean Sci. Discuss*, 6, 3019-3053.
9. Ibrayev, R.A., Zsoy, E.O., Schrum, C., and Sur, H.I., 2009. Seasonal variability of the Caspian Sea three dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science Discuss*, 6, 1913-1970.
10. Korotenko, K.A., Mamedov, R.M., and Mooers, C.N.K., 2002. Prediction of the Transport and Dispersal of Oil in the South Caspian Sea Resulting from Blowouts. *Environmental Fluid Mechanics*, 1, 383-414.
11. Korotenko, K.A., Mamedov, R.M., Kontarb, A.E., and Korotenko, L.A., 2004. Particle tracking method in the approach for prediction of Oil slick transport in the sea: modeling oil pollution resulting from river input. *J. Marine Syst.* 48, 159-170.
12. Knysh, V.V., Ibrayev, R.A., Korotaev, G.K., and Inyushina, N.V., 2008a. Seasonal Variability of Climatic Currents in the Caspian Sea Reconstructed by Assimilation of Climatic Temperature And Salinity into the Model of Water Circulation. *SSN 0001-4338, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 44 (2), 236-249.
13. Knysh, V.V., Ibrayev, R.A., Oszyo, E., Inyushina, N.V., and Korotaev, G.K., 2008b. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-04990, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-04990, EGU General Assembly 2008, © Author(s) 2008, Seasonal Variability of the Caspian Sea Circulation.
14. Lednev, V.A., 1943. Currents of the northern and central parts of the Caspian Sea. Nauka, Moscow. (In Russian)
15. Manual of MIKE 3, 2007. Coastal Hydraulic and Oceanography Hydrodynamic Module. Danish Hydraulic Institute (DHI Software), pp. 32-50.
16. Manual of MIKE 21, 2007. Coastal Hydraulic and Oceanography Hydrodynamic Module. Danish Hydraulic Institute (DHI Software), pp. 74-85.
17. Matthew, C.W., Roderick, T., and Tatsu, I., 2001. Hydrodynamic and Dispersion Modeling for the Azeri, Chirag, Gunashi Field Offshore Baku, Azerbaijan, CLIENT URS Dames & Moore PROJECT NUMBER ASA 01-007, August 2001, pp. 1-47.
18. Nasimi, S., and Ghiasi, R., 2006. A three-dimensional model of water circulation and temperature structure in the Caspian Sea. *J. Earth Space Phys.* 32, 21-35.
19. Panin, G.N., and Dzuyba, A.V., 2003. Current variations in the wind speed vector and the rate of evaporation from the Caspian Sea surface. *Water Res.* 30, 177-185.
20. Rahimpour Anaraki, H., 2005. Investigation of Hydrodynamic of currents and prediction of Erosion and Sedimentation Pattern in Groan Bay-Iran. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*, 84/322, 1-48. (In Persian)
21. Sabbagh-Yazdi, S.R., 2002. Investigation of Coriolis Forces on the Caspian Sea Currents Using a Two Dimensional Numerical Model. 4th International of Coasts, Ports and Marin Structures (ICOMPAS 2002), Ramsar, Iran.
22. Sharbaty, S., Imanpoor, M.R., Gorgin, S., and Hosseini, S., 2010. The first phase of simulation studies of short-term sea currents in the Gorgan Bay. *Research Report, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 89-2-257. (In Persian)
23. Shore Protection Manual, 1984. 4th ed., 2 Vol., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1, 088.
24. Smagorinsky, J., 1963. General circulation Experiments with the primitive equations. *Monthly weather review*, 91, 91-164.
25. Smith, S.D., and Bank, G., 2007. Variation of the sea drag coefficient with wind speed. *Quart. Met. Soc.* 101, 665-673.

26. www.cdc.noaa.org.
27. Zounemat-Kermani, M., and Sabbagh-Yazdi, S.R., 2010. Conjunction of 2D and 3D Modified Flow Solvers for Simulating Spatiotemporal Wind Induced Hydrodynamics in the Caspian Sea. *Ocean Sci. J.* 45 (2), 113-128.

Archive of SID