

مطالعه الگوی جریان در خزر جنوبی با استفاده از مدل معادلات مقدم در مختصات سیگما

جلال مفیدی^۱، مهدی محمد مهدیزاده^۲، اکبر رشیدی ابراهیم حصاری^{۳*}، حسین ملکوتی^۴^۱ دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان؛ jalal.mofidi@yahoo.com^۲ استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان^۳ استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس؛ akbar.rashidi@modares.ac.ir^۴ استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹	هدف از این مطالعه طراحی و ساخت یک مدل عددی سه بعدی باروکلینیکی در ۱۰ لایه با توانایی پذیرفتن توپوگرافی بستر پیچیده و باد متغیر در زمان و مکان جهت شبیه سازی جریانات بادرانده در حوضه خزر جنوبی می باشد. در این مطالعه برای حل عددی و گسسته سازی معادلات مقدم در مختصات کروی زمین با آرایه قائم سیگما فشاری از روش عددی تفاضل متناهی بروی شبکه آراکاوای-سی تعدیل یافته استفاده شد. داده باد ECMWF ERA 15 و عمق GEBCO با دقت مکانی ۰/۱۲۵ درجه به عنوان ورودی های مدل لحاظ گردید. نتایج نشان می دهد الگوی جریانات بادرانده در لایه سطحی خزر جنوبی شامل یک چرخه ساعت گرد در مرکز و یک جریان پاد ساعت گرد در نزدیکی سواحل غربی می باشد که در طول سال تداوم دارند. همچنین جریانات نواحی نزدیک به سواحل شرقی با توجه به عمق کم و فلات قاره گسترده به شدت به جهت و سرعت باد حساس است و همواره ماکزیمم سرعت جریان سطحی در این منطقه رخ می دهد.

A Sigma-Coordinate Primitive Equation Model for Studying the Circulation Pattern in the South Caspian Sea

Jalal Mofidi¹, Mahdi Mohammad Mahdizadeh², Akbar Rashidi Ebrahim Hesari^{3*}, Hossein Malakooti⁴¹ PhD Candidate in Physical Oceanography, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran; jalal.mofidi@yahoo.com² Faculty of Marine Science and Technology, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran;³ Faculty Member of Physical Oceanography, Tarbiat Modares University, Iran; akbar.rashidi@modares.ac.ir⁴ Faculty of Marine Science and Technology, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran;

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 Jun. 2017

Accepted: 30 Jan. 2018

Keywords:

Numerical Model

Primitive Equation

Caspian Sea

Wind-induced Current

ABSTRACT

The aim of this study was to design and develop a three-dimensional numerical baroclinic model with the ability to accept complex bottom topography and variable wind in space and time to investigation wind-induced current at 10 layers in the south Caspian Sea. The finite difference method Was used for numerical solution of the primitive equation in spherical Sigma pressure coordinate system on staggered modified Arakawa C grid. The wind data available from ECMWF ERA 15 data sets and the bathymetric data obtained from the GEBCO data sets with spatial resolutions of 0.125° were utilized in the model. The result shows there are found a cyclonic eddy in middle of the basin and an anticyclonic current in close of the western coast that continued over the year. In addition, the circulation in the extensive continental shelf near the eastern coast is especially sensitive to wind direction and speed Also the maximum of surface current always take place in this area.

۱- مقدمه

دریای خزر بزرگترین حجم آبی کاملاً محصور شده بروی زمین می‌باشد که به تنهایی نزدیک به نیمی از حجم کل آب دریاچه‌های جهان را دربر دارد. با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی و توپوگرافی بستر می‌توان دریای خزر را به سه حوضه شمالی، میانی و جنوبی تقسیم نمود. حوضه جنوبی دو سوم از حجم کل آب دریا را شامل شده که با عمق متوسط ۳۵۰ متر و حداکثر عمق ۱۰۲۵ متر عمیق‌ترین بخش دریای خزر می‌باشد [۱].

اندازه‌گیری‌های صورت گرفته جهت شناخت پدیده‌های جوی و اقیانوسی حاکم در دریای خزر با وجود ذخایر بالای زیست محیطی مانند ماهیان خاویار و منابع وسیع نفت و گاز بسیار ناکافی و بیشتر معطوف به مناطق ساحلی و کم عمق می‌باشد. لذا با توجه به اینکه بخش زیادی از نوار ساحلی خزر جنوبی متعلق به ایران است، تمرکز این مطالعه بروی بررسی الگوی ماهیانه جریانات ناشی از باد در این حوضه می‌باشد.

دریای خزر یک دریای کاملاً بسته می‌باشد که در آن جزر و مد و جریانات حاصل از آن بسیار ناچیز می‌باشد و الگوی جریان در این حوضه تحت تأثیر عواملی چون باد، ورودی رودخانه‌ها، اختلاف چگالی و امواج تشکیل می‌شود. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که باد عامل اصلی ایجاد جریان در این حوضه می‌باشد. از جمله این مطالعات می‌توان به ایبرایف و همکاران اشاره کرد که یک مدل سه بعدی بر اساس معادلات مقدم^۱ در دستگاه مختصات دکارتی با آرایه قائم Z را برای مطالعه گردش فصلی و تغییرات توده آب دریای خزر تحت تأثیر شار جرمی، مومنتم و گرما توسعه دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که چرخه فصلی تنش باد نقش تعیین کننده‌ای در تولید گردش آب در این حوضه دارد. از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به پدیده فراجوشی در طول سواحل شرقی خزر میانی، جریانات غالب جنوب‌سو در طول سواحل شرقی و غربی خزر جنوبی و همچنین حساسیت بالای جریان به سرعت و جهت باد در مناطق کم عمق خزر شمالی اشاره کرد [۲].

کورتینکو و همکاران با استفاده از مدل اقیانوسی POM^۲ انتشار آلودگی نفتی تحت تأثیر جریانات بادرانده در دریای خزر را مورد مطالعه قرار دادند. از جمله نتایج این مطالعه می‌توان به تشکیل جریاناتی با سرعت ماکزیمم در نزدیکی سواحل شرقی و غربی در مناطقی با عمق کمتر از صد متر را اشاره کرد [۳].

کارا و همکاران با استفاده از مدل اقیانوسی HYCOM^۳ تأثیرات نیروهای مختلف از جمله باد، ورودی آب رودخانه‌ها، تبخیر، بارندگی و شار شوری را بروی الگوی جریانات سطحی و تغییرات فصلی آن در دریای خزر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نیز نشان داد که باد عامل اصلی در ایجاد الگوی جریان می‌باشد و سایر نیروها

و تغییرات آنها تأثیر بسیار کمی بروی جریانات دریای خزر دارند [۴].

گوندوز و او سوی با استفاده از مدل اقیانوسی HYCOM ساختار دما-شوری و الگوی جریانات فصلی دریای خزر را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه نیز نشان دهنده تأثیر بالای باد بروی الگوی جریانات دریای خزر نسبت به سایر نیروها می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه آنها وجود یک چرخه ساعت‌گرد و یک چرخه پاد ساعت‌گرد در حوضه خزر جنوبی را نشان می‌دهد که در طول سال تداوم دارند [۵].

بنارزاده و همکاران طی مطالعه‌ای به بررسی اولیه مدل سه بعدی الگوی گردش آب خزر با استفاده از معادلات نویر استوکس و روش عددی تفاضل متناهی در سیستم مختصات دکارتی پرداختند. نتایج این مطالعه وجود سولول‌های گردشی را در سه بخش شمالی، میانی و جنوبی دریای خزر نشان داد، علاوه بر این سرعت جریانات با عمق به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند [۶].

نسیمی و غیائی با یک مدل عددی کاملاً هیدرواستاتیکی و با استفاده از روش تفاضل متناهی در مختصات دکارتی ساختار دمایی و گردش آب در دریای خزر را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه الگوی جریان در هر سه حوضه خزر شمالی، میانی و جنوبی بصورت چرخه‌های ساعت‌گرد بدست آمد [۷].

کمیجانی و همکاران جریانات خزر جنوبی را به صورت سه بعدی با استفاده از مدل ROMS^۴ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که یک جریان ساعت‌گرد قوی کل حوضه خزر جنوبی را پوشش داده و از سطح تا زیر سطح گسترده شده است [۸]. شیعه علی و همکاران ساختار افقی و قائم میدان‌های جریان و دما را در دریای خزر با استفاده از مدل COHERENS^۵ مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در اکثر ماه‌های سال الگوی اصلی جریان‌های بادرانده در خزر جنوبی به صورت ساعت‌گرد می‌باشد [۹].

استفاده از سیستم مختصات دکارتی با آرایه قائم Z در شبیه‌سازی‌های عددی در دریای خزر با توجه به توپوگرافی پیچیده بستر با مناطق فلات قاره گسترده و همچنین شیب تند بستر در نواحی عمیق، با دشواری‌هایی همراه می‌باشد، از اینرو در این مطالعه از سیستم مختصات سیگما فشاری در راستای قائم استفاده شده است. بکارگیری این دستگاه مختصات منجر به مماس شدن شبکه‌بندی عددی در سطح و بستر و افزایش دقت در این مرزها می‌شود. همچنین با توجه به استفاده از ۱۰ لایه در راستای قائم و یک سان بودن تعداد لایه‌ها در تمامی حوضه، دقت شبیه‌سازی در مناطق کم عمق و ساحلی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل عددی با توجه به استفاده از آرایه قائم سیگما فشاری این می‌باشد که مدل قابلیت پذیرفتن پستی و

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = -\frac{u^2 \tan \phi}{r} - \frac{uw}{r} - fu - \alpha \frac{1}{r} \times$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial \phi} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \right) \right] + F_\phi$$

$$\frac{1}{(p_b - p_A)} \frac{D}{Dt} (p_b - p_A) + \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \quad (۴)$$

$$\rho(s, T, p) = \frac{\rho(s, T, 0)}{1 - p/K_T(s, T, p)} \quad (۵)$$

که در این معادلات λ و ϕ محورهای دستگاه مختصات به ترتیب در راستای طول و عرض جغرافیایی می‌باشند. u مؤلفه شرق‌سوی، v مؤلفه شمال‌سوی و w مؤلفه سرسوی سرعت هستند. r فاصله شعاعی با مرکز زمین، Φ ژئوپتانسیل، ρ چگالی، p فشار، $f = 2\Omega \sin \phi$ پارامتر کریولیس و Ω بردار آهنگ چرخش زاویه‌ای زمین است. F_ϕ و F_λ مؤلفه‌های نیروی اصطکاک در راستای طول و عرض جغرافیایی می‌باشند. S ، T و K_T به ترتیب شوری، دما و ضریب پخش حرارتی را نشان می‌دهند. در رابطه (۳) $\dot{\sigma}$ معرف سرعت در راستای قائم می‌باشد که با انتگرال‌گیری از معادله پیوستگی از سطح تا تراز دلخواه سیگما به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{\sigma}(\sigma) = -\frac{1}{(p_b - p_A)} \int_{\sigma=0}^{\sigma=\sigma} \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} [(p_b - p_A)u] d\sigma - \frac{1}{(p_b - p_A)} \int_{\sigma=0}^{\sigma=\sigma} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} [(p_b - p_A)v] d\sigma - \frac{\sigma}{(p_b - p_A)} \frac{\partial}{\partial t} (p_b - p_A) \quad (۶)$$

از معادله هیدرواستاتیکی برای لایه‌بندی اولیه مدل بصورت زیر استفاده شد:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{(p_b - p_A)}{\rho} \quad (۷)$$

در این مطالعه مرجع محاسبه ژئوپتانسیل عمیق‌ترین نقطه‌ی محیط و به عنوان ژئوپتانسیل عملی^۷ در نظر گرفته شد. مقدار ژئوپتانسیل عملی برای عمیق‌ترین نقطه برابر با صفر لحاظ گردید و برای سایر

بلندی و شرایط هندسی هر حوضه دیگری را داشته و براحتی قابل استفاده برای سایر محیط‌های دریایی می‌باشد.

با توجه به اینکه اکثر مطالعات انجام گرفته در گذشته بروی الگوی جریان دریای خزر با مدل‌های تشخیصی^۶ با دقت پایین صورت گرفته است [۱۰، ۱۱ و ۱۲]، همچنین استفاده از داده‌های میانگین ماهیانه، فصلی و سالیانه با مقیاس مکانی بزرگ منجر به تفاوت در نتایج بدست آمده در اکثر مطالعات قبلی و محدود بودن شناخت ما از الگوی جریان خزر شده است. از اینرو در این مطالعه ساخت یک مدل عددی سه بعدی با قابلیت اعمال باد متغییر در زمان و مکان و پذیرفتن توپوگرافی بستر پیچیده جهت شبیه‌سازی الگوی جریان خزر جنوبی در دستور کار قرار گرفته است.

۲ - روش کار

در این پژوهش جریانات بادرانده در دریای خزر با بکار بردن معادلات مقدم در یک محیط ۱۰ لایه شبیه‌سازی شدند. این معادلات در دستگاه کروی زمین با آرایه قائم سیگما فشاری که برای اولین بار توسط فیلیپس [۱۳] معرفی شد، بازنویسی شدند. این آرایه بصورت ذیل می‌باشد:

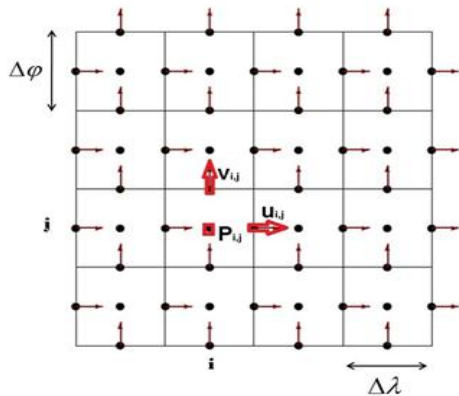
$$\sigma = \frac{p - p_A}{p_b - p_A} \quad (۱)$$

که در آن σ آرایه‌ی قائم نرمال شده، p فشار در هر نقطه از محیط، p_b فشار کف و p_A فشار جو بر روی سطح آزاد آب می‌باشند. مقدار آرایه سیگما بروی سطح آزاد برابر صفر، در کف محیط با توجه به برابر بودن فشار با فشار بستر برابر با یک و در سطوح میانی بین صفر و یک می‌باشد.

معادلات مومنتم (در راستای شرق‌سوی و شمال‌سوی)، پیوستگی و حالت پس از بازنویسی در این دستگاه مختصات بصورت ذیل می‌باشند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = \frac{uv \tan \phi}{r} - \frac{uw}{r} + fv - ew - \frac{\alpha}{r \cos \phi} \times \left[\frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{\rho}{(p_b - p_A)} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right) \right] + F_\lambda \quad (۲)$$

سرعت‌های افقی و مولفه فشار در شکل ۱ نمایش داده شد. پارامترهای تراز آب، چگالی، فاصله شعاعی تا مرکز زمین، ژئوپتانسیل و معرف قائم سیگما در مرکز سلول‌ها مورد محاسبه قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- شبکه‌بندی آراکاوی-سی تعدیل یافته در صفحه افقی

۲-۱- شرایط مرزی

تمامی سواحل خزر در این مطالعه بصورت مرز سخت و غیر لغزنده در نظر گرفته شده که مؤلفه‌های مماسی و عمودی سرعت بروی این مرزها برابر با صفر و بصورت ذیل می‌باشند:

$$\begin{cases} u(\lambda, \phi, \sigma, t) \cdot \mathbf{n} = 0 \\ v(\lambda, \phi, \sigma, t) \cdot \mathbf{n} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} u(\lambda, \phi, \sigma, t) \cdot \mathbf{t} = 0 \\ v(\lambda, \phi, \sigma, t) \cdot \mathbf{t} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

در این روابط λ ، ϕ و σ به ترتیب محورهای شرقی، شمالی و قائم دستگاه مختصات کروی زمین با آرایه قائم سیگما و $\mathbf{n}$ و $\mathbf{t}$ بردارهای یک‌ه‌ی مماسی و عمودی بر مرز می‌باشند. شرایط مرزی در سطح آب بصورت ذیل می‌باشد:

$$p = p_a \quad (16)$$

$$\left(\mathbf{A}_\sigma \frac{-g}{p_b - p_a} \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \mathbf{A}_\sigma \frac{-g}{p_b - p_a} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \left(\frac{\tau_{s\lambda}}{\rho}, \frac{\tau_{s\phi}}{\rho} \right) \quad (17)$$

که در این رابطه $\mathbf{A}_\sigma$ ضریب اددی ویسکوزیته، $\tau_{s\lambda}$ و $\tau_{s\phi}$ مولفه‌های تنش سطحی ناشی از باد در صفحه افقی می‌باشند که بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$(\tau_{s\lambda}, \tau_{s\phi}) = (C_D \rho_a |\mathbf{V}_{10}| u_{10}, C_D \rho_a |\mathbf{V}_{10}| v_{10}) \quad (18)$$

که در این رابطه u_{10} و v_{10} مولفه‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا در راستای شرق و شمال سوی می‌باشند. ρ_a

نقاط محیط با انتگرال‌گیری از معادله (۶) در راستای قائم از بستر تا نقطه‌ی دلخواه بصورت زیر محاسبه شد.

$$\Phi_{p(i,j,\sigma)} = \Phi_{p(i,j,\sigma=1)} + (p_b - p_a)(1 - \sigma) \frac{1}{\langle \rho \rangle} \quad (8)$$

که در این رابطه $\Phi_{p(i,j,\sigma)}$ ژئوپتانسیل عملی و $\langle \rho \rangle$ میانگین چگالی از بستر تا تراز دلخواه سیگما می‌باشد که با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{1 - \sigma} \int_{\sigma=1}^{\sigma=\sigma} (\rho) d\sigma \quad (9)$$

جهت اعمال فشار هیدروستاتیکی به مدل از معادله پیوستگی از سطح تا بستر انتگرال گرفته شد و معادله پیش‌بینی تمایل فشار کف^۸ بصورت زیر بدست آمد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b}{\partial t} = \frac{\partial p_a}{\partial t} - \int_{\sigma=0}^{\sigma=1} \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} [(p_b - p_a) u] d\sigma \\ - \int_{\sigma=0}^{\sigma=1} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} [(p_b - p_a) v] d\sigma \end{aligned} \quad (10)$$

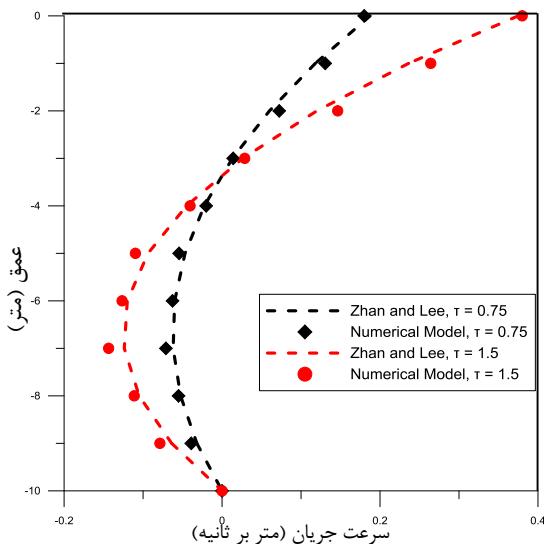
با انتگرال‌گیری از معادله هیدروستاتیکی در راستای قائم از بستر تا تراز دلخواه سیگما مقدار فاصله شعاعی هر نقطه از مرکز زمین بصورت زیر بدست می‌آید:

$$r_{(i,j,\sigma)} = r_{(i,j,\sigma=1)} + \frac{p_b - p_a}{g} \frac{(1 - \sigma)}{\langle \rho \rangle} \quad (11)$$

که در این رابطه g شتاب گرانش ناشی از جاذبه زمین و $r_{(i,j,\sigma=1)}$ فاصله شعاعی بستر دریا تا مرکز زمین می‌باشد. در دستگاه کروی زمین با آرایه‌ی قائم سیگما، مانند دستگاه کروی زمین، r یک آرایه مستقل محسوب نمی‌گردد و تابعی از چگالی، دما، شوری، فشارکف و سیگما می‌باشد. در این مطالعه تاثیر پارامترهای دما و شوری در معادله حالت بر مقدار چگالی لحاظ شده و در محاسبه فاصله شعاعی از مرکز زمین مورد محاسبه قرار گرفته است.

برای حل عددی و گسسته‌سازی معادلات از روش عددی تفاضل متناهی به این ترتیب که برای جملات فرارفتی از طرح‌واره لکس-وندروف دوگامی^۹ و برای جملات انتشاری از طرح‌واره دوفورت-فرانکل^{۱۰} استفاده گردید. طرح‌واره‌ی دوفورت-فرانکل یک طرح‌واره‌ی صریح و همیشه پایدار است ولی طرح‌واره‌ی لکس-وندروف باید شرط پایداری C.F.L^{۱۱} را ارضا نماید [۱۴].

در این مطالعه برای گسسته‌سازی مکانی معادلات از شبکه‌بندی آراکاوی-سی تعدیل یافته^{۱۲} استفاده شده است. نحوه قرارگیری



شکل ۲- مقایسه نتایج مدل عددی با حل تحلیلی

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد مقادیر سرعت افقی در عمق ۳/۵ متر به صفر رسیده و جهت سرعت بعد از این عمق در جهت عکس سرعت در لایه های سطحی می باشد. برای محاسبه نرخ خطا از درصد خطای میانگین مطلق (MAPE) استفاده شده که مقادیر خطا را بصورت درصد و با رابطه زیر مورد محاسبه قرار می دهد:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - N_i}{A_i} \right| \times 100 \quad (25)$$

که در این رابطه A_i مقادیر حل تحلیلی و N_i مقادیر حل عددی می باشد. مقایسه بین نتایج مدل عددی و حل تحلیلی برای تنش سطحی 0.75 Nm^{-2} نشان می دهد که درصد خطای میانگین مطلق تقریباً برابر با ۱۰٪ و برای تنش سطحی 1.5 Nm^{-2} تقریباً برابر با ۸٪ می باشد.

۳-۲- ورودی های مدل

در این مطالعه ابتدا شبیه سازی بروی کل دریایی خزر با دقت مکانی 0.75×0.75 درجه اجرا و خروجی های آن در عرض جغرافیایی ۴۱ درجه شمالی استخراج و به عنوان ورودی مدل در اجرای نهایی استفاده شد. طول و عرض جغرافیایی منطقه شبیه سازی شده در اجرای اولیه و همچنین منطقه مورد مطالعه خزر جنوبی در اجرای نهایی در شکل ۳ نشان داده شده است.

چگالی هوا با مقدار $1/3$ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. C_D ضریب درگ می باشد که با روش وو [۱۵]، بصورت زیر محاسبه شد:

$$C_D = \begin{cases} (0.8 + 0.065V_{10}) \times 10^{-3} & V_{10} > 7.5 \text{ m/s} \\ 1.2875 \times 10^{-3} & V_{10} < 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (19)$$

شرایط مرزی در بستر دریا با استفاده از روابط زیر تعریف شد:

$$p = p_b \quad (20)$$

$$\left(A_\sigma \frac{-g}{p_b - p_A} \frac{\partial u}{\partial \sigma}, A_\sigma \frac{-g}{p_b - p_A} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \left(\frac{\tau_{b\lambda}}{\rho}, \frac{\tau_{b\phi}}{\rho} \right) \quad (21)$$

که در این رابطه $\tau_{b\phi}$ و $\tau_{b\lambda}$ مولفه های تنش بستر در جهت شرق و شمال سوی می باشند که با رابطه زیر محاسبه شدند [۱۶]:

$$\tau_b = -m \tau_s + D \bar{V} |\bar{V}| \quad (22)$$

که در این رابطه $\bar{V}$ بردار میانگین سرعت جریان، m و D ضرایب تجربی به ترتیب برابر با مقادیر 0.07 و 0.0211 می باشند.

۲-۲- صحت سنجی مدل عددی

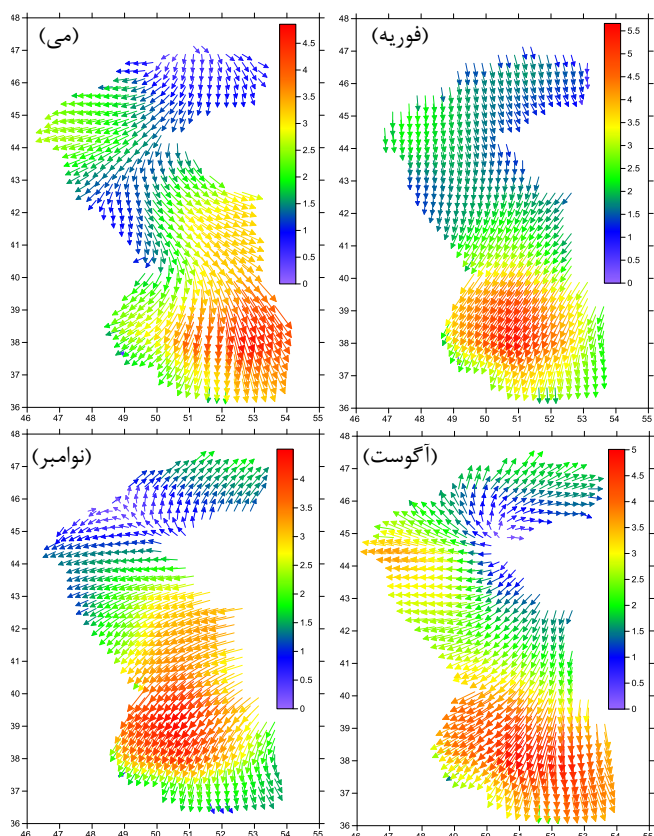
در این مطالعه جهت بررسی دقت و صحت و صغم نتایج مدل عددی، خروجی مدل با نتایج حاصل از حل تحلیلی در یک حوضه مستطیلی مورد مقایسه قرار گرفت. در این شبیه سازی پروفیل قائم سرعت افقی در مرکز یک حوضه بسته به ابعاد 2×2 کیلومتر و عمق ۱۰ متر در ده لایه سیگما با اعمال نیروی باد در سطح آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

حل تحلیلی در یک محیط مستطیلی با بستر تراز و ضریب اددی ویسکوزیته قائم ثابت بوسیله رابطه زیر محاسبه گردید [۱۷]:

$$u = \tau_{xz}^s \sigma (h + \eta) (3\sigma - 2) / 4A_v \rho \quad (23)$$

$$\sigma = (h + z) / (h + \eta) \quad (24)$$

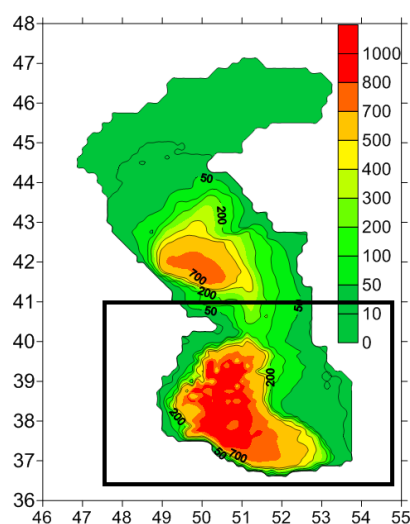
که در این رابطه τ_{xz}^s تنش سطحی باد که بوسیله دو باد ثابت در راستای شرق سو دارای مقادیر 0.75 و 1.5 Nm^{-2} می باشد. ρ چگالی آب برابر با 1000 Kg m^{-3} می باشد. این شبیه سازی در ده لایه سیگما و اندازه شبکه افقی ۱۰۰ متر، گام زمانی ۵ ثانیه و اددی ویسکوزیته قائم $0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و با صرف نظر کردن از نیروی کریولیس و ترم های افقی پخش انجام شده است.



شکل ۴- میانگین ماهیانه سرعت باد (متر بر ثانیه) در الف) فوریه، ب) می، ج) آگوست و د) نوامبر.

توجه فلات قاره گسترده و عمق کم همواره ماکزیمم سرعت جریانات سطحی در این ناحیه رخ می‌دهد. وقوع ماکزیمم سرعت جریان بادرانده در مناطق کم عمق و نزدیک به سواحل دریایی خزر در تطابق کامل با مطالعات عددی انجام شده قبلی توسط کورتکو و همکاران [۳] و ایبرایف و همکاران [۱۸] می‌باشد. در فصل پاییز و زمستان به دلیل غالب بودن باد شمال شرقی در این نواحی شاهد جریانات جنوب غربی می‌باشیم که با شروع فصل بهار در ماه مارس و شمال غربی شدن باد غالب در طی فصول بهار و تابستان، جریان غالب در این ناحیه تغییر جهت داده و به جریانات جنوب شرقی تبدیل می‌شود.

در بخش مرکزی خزر جنوبی شاهد یک چرخه ساعت گرد می‌باشیم که در اکثر ماه های سال تداوم دارد. این چرخه در بین طول جغرافیایی ۵۰ تا ۵۱ درجه شرقی واگرا شده و با یک چرخش پادساعت گرد جریانات نزدیک به سواحل غربی را شکل می‌دهد. تغییرات در الگوی جریانات بخش مرکزی با توجه به ثبات نسبی در جهت باد در اکثر ماه های سال در این ناحیه بسیار اندک می‌باشد. در نزدیکی سواحل غربی خزر جنوبی شاهد دو الگوی جریانات سطحی می‌باشیم که از ماه آپریل تا سپتامبر این جریانات عمود بر ساحل و از ماه اکتبر تا مارس موازی با ساحل می‌باشند. جریانات موازی با ساحل می‌تواند موجب انتقال توده آب در راستای عمود بر



شکل ۳- توپوگرافی (بر حسب متر) دریای خزر و منطقه مورد مطالعه خزر جنوبی (مستطیل مشکی رنگ).

شبکه‌بندی مدل برای خزر جنوبی با مختصات ۳۶ تا ۴۱ درجه شمالی و ۴۶ تا ۵۵ درجه شرقی و دقت مکانی ۰/۱۲۵ درجه در راستاهای طول و عرض جغرافیایی لحاظ گردید. در این مطالعه از داده های عمق و باد موجود در پایگاه های GEBCO^{۱۳} و ERA15^{۱۴} ECMWF با دقت مکانی ۰/۱۲۵ و گام زمانی ۲۴ ساعته استفاده شده است. به علت تطابق بالای داده های باد سال ۱۹۸۲ با داده های ایستگاه های هواشناسی [۲] این مجموعه داده به عنوان گزینه مناسب جهت ورودی به مدل انتخاب شد.

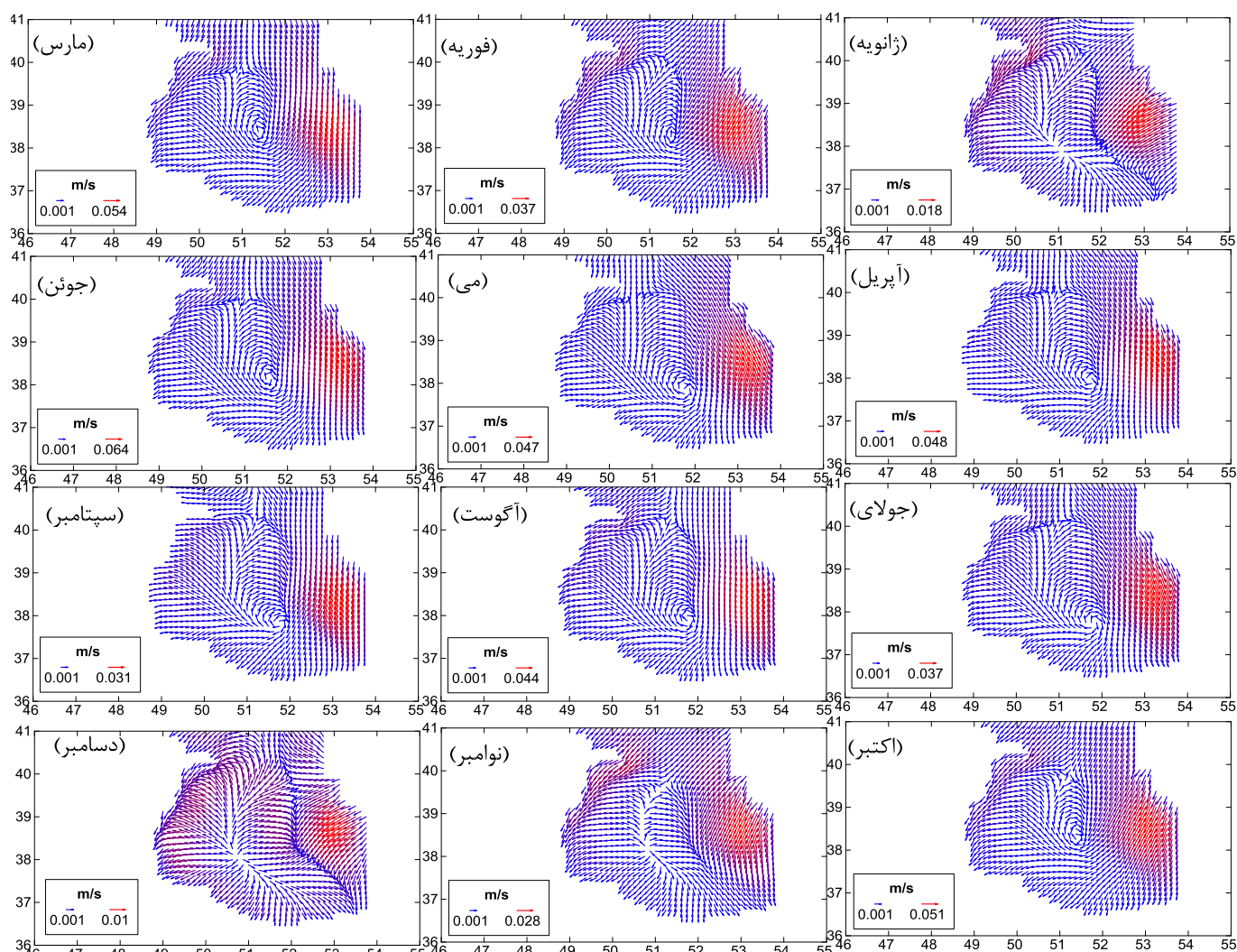
۳- نتایج

۳-۱- میدان باد

محاسبه میانگین فصلی و ماهیانه سرعت باد نشان می‌دهد که در بخش خزر جنوبی در قسمت های مرکزی و در نزدیکی سواحل غربی جهت باد در طی سال تغییرات اندکی داشته و در اغلب ماه ها شاهد باد غالب شمال و شمال شرقی در این حوضه می‌باشیم. در نواحی کم عمق نزدیک به سواحل شرقی شاهد تغییر در جهت وزش باد در طول ماه های مختلف می‌باشیم، بطوریکه جهت وزش باد غالب از سمت شمال در ماه ژانویه به باد شمال شرقی در ماه مارس و باد شمال غربی در ماه آپریل تبدیل شده است. وزش باد غربی تا ماه سپتامبر در این نواحی ادامه داشته که در ماه نوامبر به باد غالب از سمت شرق تغییر جهت میدهد. از نوامبر تا ژانویه جهت باد به آرامی از شرق به شمال تغییر پیدا کرده است (شکل ۴).

۳-۲- جریانات سطحی

الگوی میانگین ماهیانه جریانات سطحی در خزر جنوبی در شکل ۵ نمایش داده شد. مقدار سرعت و جهت جریان در نزدیکی سواحل شرقی بسیار حساس به جهت و سرعت باد در منطقه می‌باشد و با



شکل ۵- میانگین ماهیانه جریانات سطحی (متر بر ثانیه) خزر جنوبی.

جدول ۱- مقادیر ماکزیم میانگین ماهیانه سرعت باد و جریان

ماکزیم سرعت باد m/s	ماکزیم سرعت جریان cm/s	
۳/۵۰	۱/۸۶	ژانویه
۵/۶۶	۳/۷۰	فوریه
۵/۴۳	۵/۴۵	مارس
۴/۳۴	۴/۸۳	آوریل
۴/۸۵	۴/۷۰	می
۵/۸۴	۶/۴۸	ژوئن
۴/۰۷	۳/۷۲	جولای
۵/۰۰	۴/۴۴	آگوست
۵/۱۰	۳/۱۳	سپتامبر
۵/۴۲	۵/۱۴	اکتبر
۴/۵۲	۲/۸۹	نوامبر
۲/۰۶	۱/۰۳	دسامبر

شده در میانگین سرعت جریان در این دو ماه به علت قرارگیری ماکزیم سرعت باد بر روی نواحی با عمق بالا در ماههای فوریه و

ساحل و شکل گیری پدیده فروجوشی در این نواحی شود. در سواحل جنوبی دریای خزر جریانات موجود متأثر از جریانات سواحل شرقی و چرخه ساعت گرد مرکزی می باشد که شدت و ضعف هر یک از این الگوها جریان غالب در این سواحل را شکل می دهد. ماکزیم میانگین ماهیانه سرعت باد و جریانات سطحی در طول سال در جدول ۱ نمایش داده شد. همانطور که مشاهده می شود ماکزیم و مینیمم سرعت باد موجب ایجاد ماکزیم و مینیمم سرعت جریان در این منطقه می شوند. بیشترین سرعت میانگین ماهیانه جریان در خزر جنوبی مربوط به ماه جون به میزان $6/48 cm/s$ و مینیمم آن مربوط به ماه دسامبر به میزان $1/03 cm/s$ می باشد، همچنین بیشترین سرعت میانگین ماهیانه باد در ماه جون به میزان $5/84 m/s$ و کمترین مقدار آن مربوط به ماه دسامبر به میزان $2/06 m/s$ می باشد.

با توجه به جدول ۱ در اکثر ماههای سال بجز مارس و سپتامبر با افزایش ماکزیم میانگین ماهیانه سرعت باد، ماکزیم میانگین ماهیانه سرعت جریان سطحی نیز افزایش می یابد. تغییرات ایجاد

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جریانات بادرانده در خزر جنوبی با استفاده از طراحی و توسعه یک مدل عددی سه بعدی باروکلینیکي مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که محل تلاقی چرخه ساعت‌گرد مرکزی با جریانات نزدیک به سواحل شرقی و غربی در نواحی با شیب بالای بستر که بیشترین تغییرات عمق را دارند رخ می‌دهد، این امر نشان دهنده تأثیرات بالای توپوگرافی بستر بر الگوی جریان در خزر جنوبی می‌باشد. همچنین تحلیل همزمان الگوی باد و جریانات سطحی نشان داد که جریانات این ناحیه به شدت به الگوی جوی وابسته بوده و ترکیب تأثیرات جوی با تغییرات توپوگرافی بستر الگوی جریان در این حوضه را شکل می‌دهد.

جهت جریانات سطحی در مناطق کم عمق غالباً در جهت وزش باد با انحراف بسیار اندک به سمت راست به دلیل تأثیرات نیروی کریولیس و اصطکاک زیاد بستر می‌باشد. تغییرات سرعت جریان در راستای قائم نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات در لایه‌های نزدیک سطح رخ می‌دهد و این تغییرات از لایه‌میان تا بستر بصورت کاملاً تدریجی و بسیار ناچیز می‌باشد که این امر در تطابق کامل با تئوری اکمن می‌باشد. همچنین الگوی جریان ساعت‌گرد سطحی در خزر جنوبی که در اکثر ماه‌های سال تداوم دارد، تطابق بالایی با مطالعات مشابه قبلی انجام شده در این حوضه از جمله مطالعه کمیجانی و همکاران [۸] و همچنین مطالعه شیعه علی و همکاران [۹] دارد. در این شبیه‌سازی ماکزیمم سرعت جریان سطحی در خزر جنوبی همواره در مناطق کم عمق نزدیک به سواحل شرقی رخ می‌دهد که با توجه به قرارگیری ماکزیمم سرعت باد در اکثر ماه‌های سال و همچنین فلات قاره گسترده در این ناحیه قابل توجیه می‌باشد در حالی که در مطالعه کمیجانی و همکاران [۸] و مطالعه شیعه علی و همکاران [۹] مقادیر ماکزیمم سرعت جریانات سطحی غالباً در نزدیکی سواحل جنوبی و غربی رخ می‌دهد، البته جهت غالب جریانات سطحی ایجاد شده در این نواحی در راستای جنوب بوده که با مطالعات ذکر شده در تطابق می‌باشد.

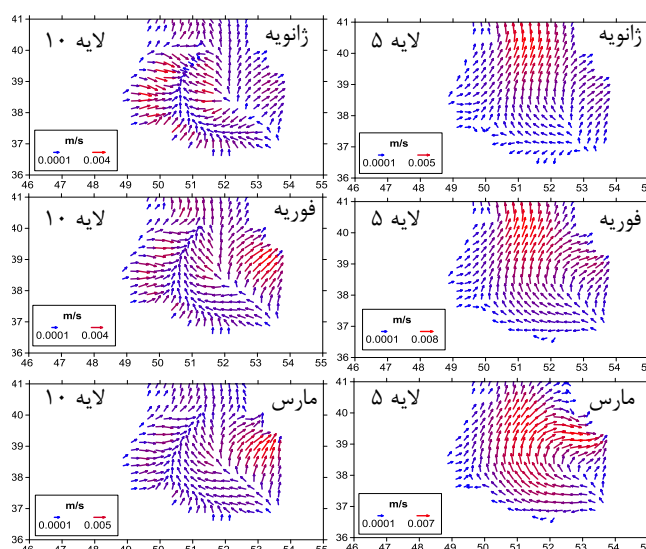
۵- واژگان کلیدی

- 1- Primitive equation
- 2- Princeton Ocean Model
- 3- HYbrid Coordinate Ocean Model
- 4- Regional Ocean Modeling System
- 5- COupled Hydrodynamical Ecological model for REgionNal Shelf seas
- 6- Diagnostic models
- 7- Practical geopotential
- 8- Bottom pressure tendency equation
- 9- Two Step Lax-Wendroff scheme
- 10- DuFort-Frankel scheme
- 11- Courant, Friedrichs and Lewy stability condition

سپتامبر رخ می‌دهد، در حالی که در ماه‌هایی از سال که شاهد افزایش ماکزیمم سرعت جریان میانگین ماهیانه می‌باشیم ماکزیمم سرعت باد در نواحی نزدیکتر به سواحل کم عمق شرقی واقع شده است. با توجه به تأثیرپذیری بیشتر سرعت جریان در مناطق کم عمق دریای خزر نسبت به سرعت و جهت باد، قرارگیری باد با سرعت پایین در بالای مناطق کم عمق موجب ایجاد ماکزیمم جریان با سرعت پایین‌تری خواهد شد.

۳-۳- جریانات لایه میانی و بستری

محل قرارگیری لایه پنجم در عمق‌هایی می‌باشد که خزر جنوبی را از سطح تا بستر به دو قسمت تقسیم می‌کند. جریان میانگین ماهیانه در سه ماه اول سال در این لایه و همچنین در لایه دهم که نزدیکترین لایه به بستر می‌باشد در شکل ۶ نمایش داده شد. جهت جریانات در نزدیکی سواحل شرقی در این لایه‌ها به سمت شمال شرقی و در خلاف جهت جریانات جنوب شرقی سطحی می‌باشند. در نزدیکی سواحل غربی نیز جهت جریان در لایه‌های زیرین در خلاف جهت جریانات سطحی می‌باشند. در بخش مرکزی جریان ساعت‌گرد گسترده‌ای قرار می‌گیرد که نشان دهنده گسترش چرخه ساعت‌گرد سطحی به عمق می‌باشد. این جریان ساعت‌گرد در لایه بستری با جریانات نزدیک به سواحل غربی خزر جنوبی همگرا می‌شود. همگرایی این جریانات در نقاطی با عمق بالا و در نزدیکی محل‌های واگرایی جریانات سطحی رخ می‌دهد.



شکل ۶- میانگین ماهیانه سرعت جریانات (متر بر ثانیه) در سه ماه اول سال در لایه پنجم و دهم.

همچنین با توجه به شکل ۶ مقادیر سرعت لایه میانی و بستری در حد چند میلیمتر بر ثانیه بوده و اختلاف بین آن‌ها بسیار ناچیز می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات سرعت جریانات بادرانده در لایه‌های سطحی و نزدیک به سطح رخ می‌دهد.

variation of three-dimensional circulation in the Caspian Sea, J. Geo_Marine Sciences, vol. 45(5), p. 671-686.

10- Akhverdiev, I. O. and Demin, Y. L., (1989), *O structure sinopticheskikh techeniy Kaspiiskogo morya v letniy sezon po rezultatam diagnosticheskikh raschetov*, in: Kaspiiskoe more. Struktura i dinamika vod, edited by: Kosarev, A. N., Nauka, Moscow, USSR, 5-15.

11- Badalov, A. B. and Rzhaplinski, D. G., (1989), *Modelirovanie dinamiki deyatelnogo sloya Kaspiiskogo morya pod deystviem sinopticheskikh atmosferynykh prosessov*, in: Modelirovanie gidrofizicheskikh prosessov i poley v zamknutykh vodoemah i moryah, Nauka, Moscow, edited by: Sarkisyan, A. S., USSR, 31-51.

12- Sarkisyan, A. S., Zaripov, R., Kosarev, A. N., and Rzhaplinski, D. G., (1976), *Diagnostichekieskie raschety techeniy v Kaspiiskom more*, Izvestiya AN, Fizika Atmos. i Okeana, vol. 12(10), p. 1106-1110.

13- Phillips NA., (1957), *A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting*, Journal of Meteorology, vol. 14(2):184-5.

14- Haltiner, G. J. and Williams, R. T., (1980), *Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*, John Wiley & sons.

15- Wu, J., (1982), *Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane*, Journal of Geophysical Research: Oceans 87 (C12):9704-9706.

16- Nihoul, J. C.J., (1977), *Three-dimensional model of tides and storm surges in a shallow well-mixed continental sea*, Dynamics of Atmospheres and Oceans, vol. 2 (1), p.29-47.

17- Li, Y.S. and Zhan, J.M, (1993), *An efficient dimensional semi-implicit element scheme for simulation of free surface flows*, Int. J. Num. Methods Fluids, Vol. 16, p. 187-198.

18- Ibraev, I., Ozsoy, E., Ametistova, L., Sarkisyan, A. and Sur, H., (1998) *Seasonal variability of the Caspian Sea dynamics: barotropic motion driven by climatic wind stress and Volga River discharge*, In: Konstantin Fedorov Memorial Symposium, Sankt-Petersburg, Pushkin, St. Petersburg, p. 18-22.

12- Modified Arakawa-C

13- General Bathymetric Chart of the Oceans (www.gebco.net)

14- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (www.ecmwf.int)

۵- مراجع

1- Kosarev, A. N., Tuzhilkin, V. S. and Kostianoy, A. G., (2004), *Main features of the Caspian Sea hydrology*, In Dying and Dead Seas Climatic Versus Anthropic Causes, p. 159-184.

2- Ibrayev, R. A., Zsoy, E. O., Schrum, S. and Sur, H., (2010), *Seasonal variability of the Caspian Sea three dimensional circulation, sea level and air-sea interaction*, Ocean Sci Discuss, Vol. 6, p. 1913-1970.

3- Korotenko, K., Mamedov, R., Kontar, A. and Korotenko, L., (2004), *Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input*, Journal of Marine Systems, Vol. 48, p. 159-170.

4- Kara, A. B., Wallcraft, A. J., Metzger, E. J. and Gunduz, M., (2010), *Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea*, Continental Shelf Research, vol. 30(10), p. 1211-1225.

5- Gunduz, M., Zsoy, E. O., (2014), *Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea*, Ocean Sci, Vol. 10, p. 459-471.

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

7- Nasimi, S. and Ghiassi, R., (2006), *A three-dimensional model of water circulation and temperature structure in the Caspian Sea*, Environmental Problems in Coastal Regions VI: Including Oil Spill Studies, vol. 88, p. 261-272.

8- Komeijani, F., Chegini, V., Sadrinasab, M. and Siadatmosavi, S. M., (2016), *Simulation of 3D current pattern, sea surface temperature and salinity distribution in sought of Caspian sea*, J. Marine Engineering, vol. 12(23), p. 69-80 (In Persian).

9- Shiea, M., Chegini, V. and Bidokhti, A. A., (2016), *Impact of wind and thermal forcing on the seasonal*