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

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹

کلمات کلیدی:
مدلسازی عددی
معادلات مقدم
دریای خزر
جریانات بادرانده

چکیده

هدف از این مطالعه طراحی و ساخت یک مدل عددی سه بعدی باروکلینیکی در ۱۰ لایه با توانایی پذیرفتن توپوگرافی بستر پیچیده و باد متغییر در زمان و مکان جهت شبیه سازی جریانات بادرانده در حوضه خزر جنوبی می‌باشد. در این مطالعه برای حل عددی و گسسته‌سازی معادلات مقدم در دستگاه 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 ورودی‌های مدل لحاظ گردید. نتایج نشان می‌دهد الگوی جریانات بادرانده در لایه سطحی خزر جنوبی شامل یک چرخه ساعت‌گرد در مرکز و یک جریان پاد ساعت‌گرد در نزدیکی سواحل غربی می‌باشد که در طول سال تداوم دارند. هچنین 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 می‌دهد.

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

Jalal Mofidi[1], Mahdi Mohammad Mahdizadeh[2], Akbar Rashidi Ebrahim Hesari[3]*, Hossein Malakooti[4]

[1] PhD Candidate in Physical Oceanography, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran; jalal.mofidi@yahoo.com
[2] 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.ir
[4] 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 shelve near the eastern coast is especially sensitive to wind direction and speed Also the maximum of surface current always take place in this area.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]

۱ – مقدمه

دریای خزر بزرگترین حجم آبی کاملا محصـــور شـــده بروی زمین می‌با شد 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 شـــده که با عمق متوســـط ۳۵۰ متر و حداکثر عمق ۱۰۲۵ متر عمیق‌ترین بخش دریای خزر می‌باشد [۱].

اندازه‌گیری‌های صـــورت گرفته جهت شـــناخت پدیدهای 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 می‌با شد. لذا با توجه به اینکه بخش زیادی از نوار ســـاحلی خزر جنوبی متعلق به ایران اســـت، تمرکز این مطالعه بروی برر سی الگوی ماهیانه جریانات نا شی از باد در این حوضه می‌باشد.

دریای خزر یک دریای کاملا بسـته می‌باشـد که در آن جزر و مد و جریانات حا صل از آن بسیار ناچیز می‌با شد و الگوی جریان در این حوضـــه تحت تاثیر عواملی چون باد، ورودی رودخانه‌ها، اختلاف چگالی و امواج تشکیل می شود. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که باد عامل ا صلی ایجاد جریان در این حو ضه می‌با شد. از جمله این مطالعات می‌توان به ایبرایف و همکاران ا شاره 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 شـار جرمی، مومنتم و گرما توسـعه دادند. نتایج مطالعه آنها نشـان داد که چرخه فصـلی تنش باد نقش تعیین کننده‌ای در تولید گردش آب در این حوضـــه دارد. از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به پدیده فراجوشـی در طول سـواحل شـرقی 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].

کورتنکو و همکاران با اسـتفاده از مدل اقیانوسـی POM[۲] انتشـار آلودگی نفتی تحت تاثیر جریانات بادرانده در دریای خزر را مورد مطالعه قرار دادند. از جمله نتایج این مطالعه می‌توان به تشـکیل جریاناتی با سـرعت ماکزیمم در نزدیکی سـواحل شـرقی و غربی در مناطقی با عمق کمتر از صد متر را اشاره کرد [۳].

کارا و همکاران با اسـتفاده از مدل اقیانوسـی HYCOM[۳] تاثیرات 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 نشـان داد که باد عامل اصلی در ایجاد الگوی جریان می‌باشد و سایر نیروها و تغییرات آنها تاثیر بسـیار کمی بروی جریانات دریای خزر دارند [۴].

گوندوز و او سوی با ا ستفاده از مدل اقیانو سی HYCOM ساختار دما- شوری و الگوی جریانات فصلی دریای خزر را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه نیز نشـان دهنده تاثیر 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].

بنازاده 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 سلول‌های 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].

نسـیمی و غیاثی با یک مدل عددی کاملاً هیدرواسـتاتیکی 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 اسـتفاده 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 سـاختار افقی و قائم میدان‌های جریان و دما را در دریای خزر با ا ستفاده از مدل COHERENS[۵] مورد برر سی قرار دادند و نشان دادند که در اکثر ماه‌های سال الگوی اصلی جریان‌های بادرانده در خزر جنوبی به صورت ساعت‌گرد می‌باشد[۹].

اسـتفاده از سـیتم مختصـات 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 اسـت. بکارگیری این دسـتگاه مختصـات منجربه مماس شـدن شبکه‌بندی عددی در سطح و بستر و افزایش دقت در این مرزها می شود. همچنین با توجه به استفاده از ۱۰ لایه در راستای قائم و یکسان بودن تعداد لایه‌ها در تمامی حوضه، دقت شبیه سازی در مناطق کم عمق و سـاحلی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل عددی با توجه به اسـتفاده از آرایه قائم سیگما فشاری این می‌باشد که مدل قابلیت پذیرفتن پستی و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]

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 و۱۲]، همچنین استفاده از داده‌های میانگین ماهیانه، فصلی و سالیانه با مقیاس مکانی بزرگ منجربه 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 شبیه سازی الگوی جریان خزر جنوبی در دستور کار قرار گرفته است.

۲ - روش کار

دراین 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:

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

که در آن σ آرایه‌ی قائم نرمال شده، p فشار در هر نقطه از محیط، p_b فشار کف و p_A فشار جوّ 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:

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r\cos\phi}\frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{r}\frac{\partial v}{\partial \phi} + \dot{\sigma}\frac{\partial v}{\partial \sigma} = -\frac{u^2\tan\phi}{r} - \frac{uw}{r} - fu - \alpha\frac{1}{r}\times \left[\frac{\partial p}{\partial \phi} + \frac{\rho}{\left(p_b - p_A\right)}\frac{\partial p}{\partial \sigma}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \phi}\right)\right] + F_\phi \qquad (۳)$$

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

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

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_λ و F_ϕ مولفه‌های 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:

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

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

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

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]

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

$$\Phi_{p(i,j,\sigma)} = \Phi_{p(i,j,\sigma=1)} + (p_b - p_A)(1-\sigma)\frac{1}{\langle\rho\rangle} \qquad (۸)$$

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:

$$\langle\rho\rangle = \frac{1}{1-\sigma}\int_{\sigma=1}^{\sigma=\sigma}(\rho)d\sigma \qquad (۹)$$

جهت اعمال فشار هیدرودینامیکی به مدل از معادله پیوستگی از سطح تا بستر انتگرال گرفته شد و معادله پیش‌بینی تمایل فشار کف[8] بصورت زیر بدست آمد:

$$\frac{\partial p_b}{\partial t} = \frac{\partial p_A}{\partial t} - \int_{\sigma=0}^{\sigma=1}\frac{1}{r\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\lambda}\left[(p_b - p_A)u\right]d\sigma - \int_{\sigma=0}^{\sigma=1}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\phi}\left[(p_b - p_A)v\right]d\sigma \qquad (۱۰)$$

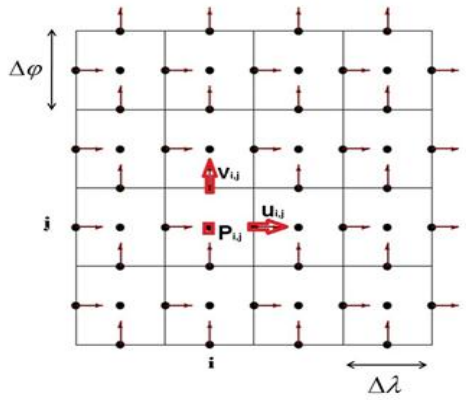
با انتگرال‌گیری از معادله هیدرواستاتیکی در راستای قائم از بستر تا تراز دلخواه سیگما مقدار فاصله شعاعی هر نقطه از مرکز زمین بصورت زیر بدست می‌آید:

$$r_{(i,j,\sigma)} = r_{(i,j,\sigma=1)} + \frac{p_b - p_A}{g}\frac{(1-\sigma)}{\langle\rho\rangle} \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه g شتاب گرانش نا شی از جاذبه زمین و $r_{(i,j,\sigma=1)}$ فا صله شعاعی بستر دریا تا مرکز زمین می‌با شد. در د ستگاه 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 گ سسته سازی معادلات از روش عددی تفا ضل متناهی به این ترتیب که برای جملات فرارفتی از طرحواره لکس-وندروف دوگامی[9] و برای جملات انتشاری از طرح واره دوفورت-فرانکل[10] استفاده گردید. طرحواره‌ی دوفورت-فرانکل یک طرحواره‌ی صریح و همیشه پایدار است ولی طرحواره‌ی لکس-وندروف باید شرط پایداری C.F.L[11] را ارضا نماید [۱۴].

در این مطالعه برای گسسته‌سازی مکانی معادلات از شبکه‌بندی آراکاوای- سی تعدیل یافته[12] ا ستفاده شده ا ست. نحوه قرارگیری سرعت‌های افقی و مولفه فشار در شکل ۱ نمایش داده شد. پارامتر های تراز آب، چگالی، فاصله شعاعی تا مرکز زمین، ژئوپتانسیل و معرف قائم سیگما در مرکز سلول‌ها مورد محاسبه قرار گرفته‌اند.



شکل۱- شبکه‌بندی آراکاوای-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:

$$\begin{cases} u(\lambda,\varphi,\sigma,t)\cdot\mathbf{n} = 0 \\ v(\lambda,\varphi,\sigma,t)\cdot\mathbf{n} = 0 \end{cases} \qquad (۱۴)$$

$$\begin{cases} u(\lambda,\varphi,\sigma,t)\cdot\mathbf{t} = 0 \\ v(\lambda,\varphi,\sigma,t)\cdot\mathbf{t} = 0 \end{cases} \qquad (۱۵)$$

در این روابط λ، ϕ و σ به ترتیب محورهای شرقی، شمالی و قائم د ستگاه مختصات کروی زمین با آرایه قائم سیگما و $\mathbf{t}$ و $\mathbf{n}$ بردارهای یکه‌ی مماسی و عمودی بر مرز می‌باشند.

شرایط مرزی در سطح آب بصورت ذیل می‌باشد:

$$p = p_a \qquad (۱۶)$$

$$\left(\mathbf{A}_\sigma\frac{-g}{p_b - p_A}\frac{\partial u}{\partial\sigma},\ \mathbf{A}_\sigma\frac{-g}{p_b - p_A}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right) = \left(\frac{\tau_{s\lambda}}{\rho},\frac{\tau_{s\phi}}{\rho}\right) \qquad (۱۷)$$

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

$$\left(\tau_{s\lambda},\tau_{s\phi}\right) = \left(C_D\,\rho_a|\mathbf{V}_{10}|u_{10}, C_D\,\rho_a|\mathbf{V}_{10}|v_{10}\right) \qquad (۱۸)$$

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]

چگالی هوا با مقدار ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. C_D ضریب درگ می‌باشد که با روش وو [۱۵]، بصورت زیر محاسبه شد:

$$C_D=\begin{cases}(0.8+0.065V_{10})\times10^{-3} & V_{10}>7.5m/s\\ 1.2875\times10^{-3} & V_{10}<7.5m/s\end{cases} \quad (۱۹)$$

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

$$p=p_b \quad (۲۰)$$

$$\left(\mathbf{A}_\sigma\frac{-g}{p_b-p_A}\frac{\partial u}{\partial\sigma},\ \mathbf{A}_\sigma\frac{-g}{p_b-p_A}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)=\left(\frac{\tau_{b\lambda}}{\rho},\frac{\tau_{b\phi}}{\rho}\right) \quad (۲۱)$$

که در این رابطه $\tau_{b\lambda}$ و $\tau_{b\phi}$ مولفه‌های تنش بستر در جهت شرق و شمال‌سوی می‌باشند که با رابطه زیر محاسبه شدند [۱۶]:

$$\tau_b=-m\ \tau_s+D\bar{\mathbf{V}}|\bar{\mathbf{V}}| \quad (۲۲)$$

که در این رابطه $\bar{\mathbf{V}}$ بردار میانگین سرعت جریان، m و D ضرایب تجربی به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۰۷ و ۰/۰۰۲۱۱ می‌باشند.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل عددی

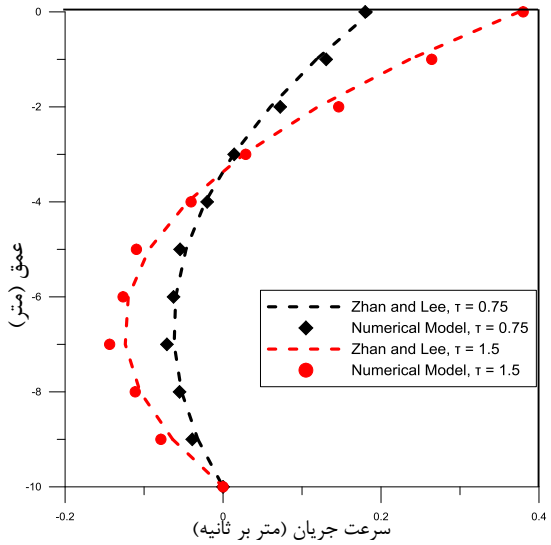
در این مطالعه جهت بررسی دقت و صحت و صغم نتایج مدل عددی، خروجی مدل با نتایج حا صل از حل تحلیلی در یک حو ضه مستطیلی مورد مقایسه قرار گرفت. در این شبیه‌سازی پروفیل قائم سرعت افقی در مرکز یک حوضه بسته به ابعاد ۲×۲ کیلومتر و عمق ۱۰ متر در ده لایه سیگما با اعمال نیروی باد در سطح آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

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

$$u=\tau_{xz}^s\ \sigma(h+\eta)(3\sigma-2)/4A_v\rho \quad (۲۳)$$

$$\sigma=(h+z)/(h+\eta) \quad (۲۴)$$

که در این رابطه τ_{xz}^s تنش سطحی باد که بوسیله دو باد ثابت در راستای شرق‌سو دارای مقادیر ۰/۷۵ و ۱/۵ Nm^{-2} می‌باشد. ρ چگالی آب برابر با ۱۰۰۰ Kgm^{-3} می‌باشد. این شبیه‌سازی در ده لایه سیگما و اندازه شبکه افقی ۱۰۰ متر، گام زمانی ۵ ثانیه و ادی ویسکوزیته قائم ۰/۰۱ m^2s^{-1} و با صرفنظر کردن از نیروی کریولیس و ترم‌های افقی پخش انجام شده است.



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 می‌باشد.

برای محا سبه نرخ خطا از در صد خطای میانگین مطلق (MAPE) استفاده شده که مقادیر خطا را بصورت در صد و با رابطه زیر مورد محاسبه قرار می‌دهد:

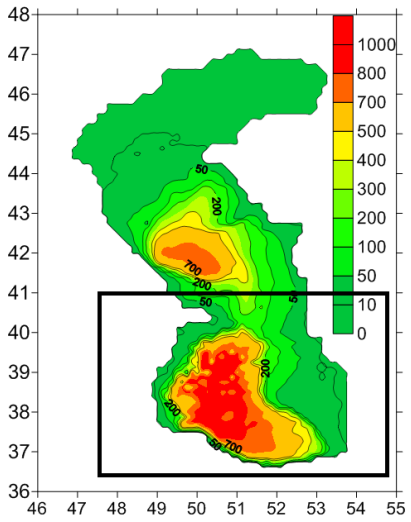
$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{A_i-N_i}{A_i}\right|\times100 \quad (۲۵)$$

که در این رابطه A_i مقادیر حل تحلیلی و N_i مقادیر حل عددی می‌باشد. مقایسه بین نتایج مدل عددی و حل تحلیلی برای تنش سطحی ۰/۷۵ Nm^{-2} نشان می‌دهد که درصد خطای میانگین مطلق تقریباً برابر با ۱۰٪ و برای تنش سطحی ۱,۵ Nm^{-2} تقریباً برابر با ۸٪ می‌باشد.

۲-۳- ورودی‌های مدل

در این مطالعه ابتدا شبیه‌سازی بروی کل دریایی خزر با دقت مکانی ۰/۷۵×۰/۷۵ درجه اجرا و خروجی‌های 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]



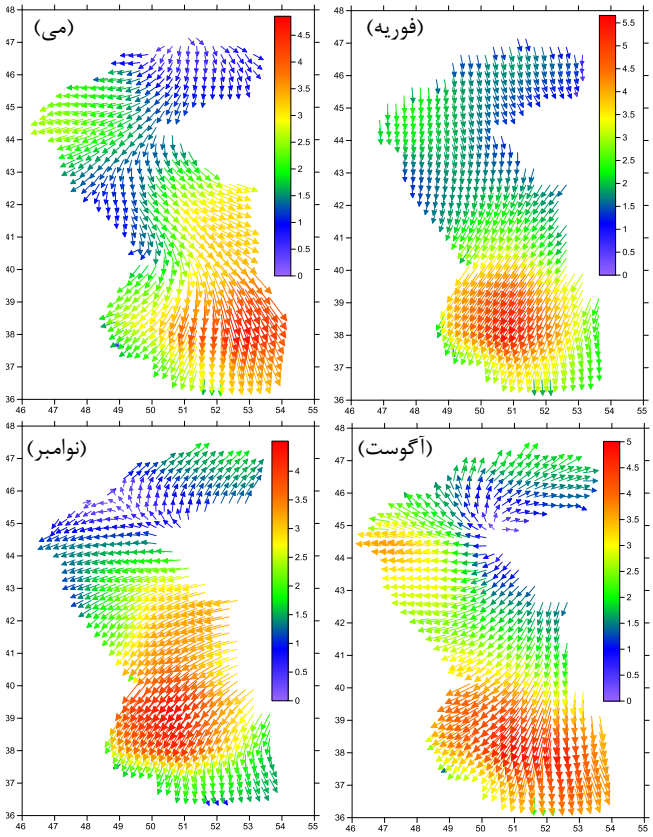
شکل ۳- توپوگرافی (بر حسب متر) دریای خزر و منطقه مورد مطالعه خزر جنوبی (مستطیل مشکی رنگ).

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 داده‌های عمق و باد موجود در پایگاه‌های GEBCO[۱۳] و ECMWF[۱۴]ERA15 با دقت مکانی ۰/۱۲۵ و گام زمانی ۲۴ ساعته استفاده شده است. به علت تطابق بالای داده‌های باد سال ۱۹۸۲ با داده‌های ایستگاه‌های 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 قسمت‌های مرکزی و در نزدیکی سواحل غربی جهت باد در طی سال تغییرات اندکی داشته و در اغلب ماه‌ها 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 ماه‌های 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).



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 کورتنکو 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 وتابستان، جریان غالب در این ناحیه تغییر جهت داده و به جریانات جنوب شرقی تبدیل می‌شود.

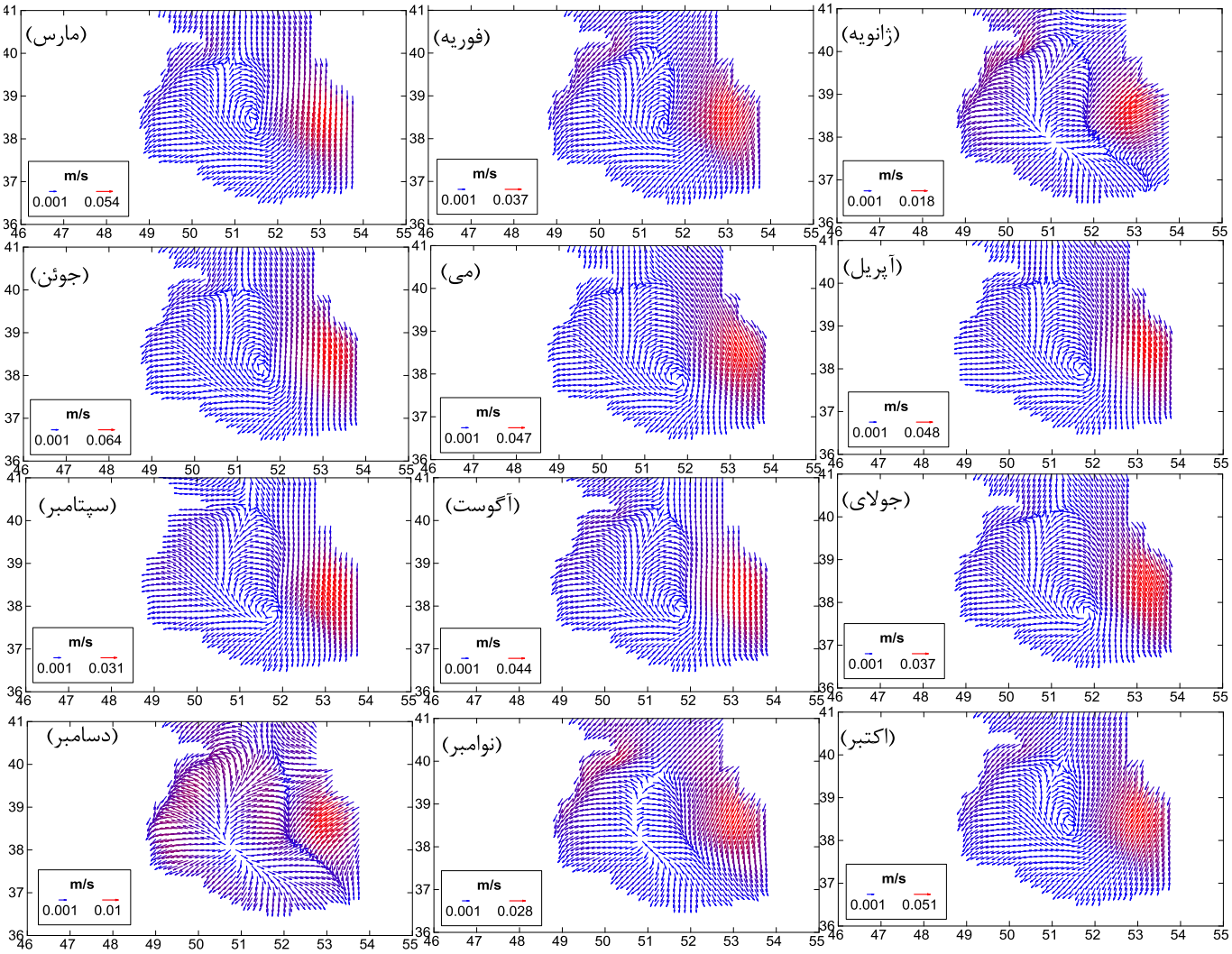
در بخش مرکزی خزر جنوبی شاهد یک چرخه ساعت‌گرد می‌باشیم که در اکثر ماه های سال تداوم دارد. این چرخه در بین طول جغرافیایی ۵۰ تا ۵۱ درجه شرقی واگرا شده و با یک چرخش پادساعت‌گرد جریانات نزدیک به سواحل غربی را شکل می‌دهد. تغییرات در الگوی جریانات بخش مرکزی با توجه به ثبات نسبی در جهت باد در اکثر ماه‌های سال 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

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]



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

ساحل و شکل‌گیری پدیده فروجوشی در این نواحی شود. در سواحل جنوبی دریایی خزر جریانات موجود متاثر از جریانات سواحل شرقی و چرخه ساعت‌گرد مرکزی می‌باشند که شدت و ضعف هر یک از این الگوها جریان غالب در این سواحل را شکل می‌دهد. ماکزیمم میانگین ماهیانه سرعت باد و جریانات سطحی در طول سال در جدول ۱ نمایش داده شد. همانطور که مشاهده می‌شود ماکزیمم و مینیمم سرعت باد موجب ایجاد ماکزیمم و مینمم سرعت جریان در این منطقه می‌شوند. بیشترین سرعت میانگین ماهیانه جریان در خزر جنوبی مربوط به ماه جوئن به میزان $6/48 cm/s$ و مینیمم آن مربوط به ماه دسامبر به میزان $1/03 cm/s$ می‌باشد، همچنین بیشترین سرعت میانگین ماهیانه باد در ماه جوئن به میزان $5/84 m/s$ و کمترین مقدار آن مربوط به ماه دسامبر به میزان $2/06 m/s$ می‌باشد.

با توجه به جدول ۱ در اکثر ماه‌های سال بجز مارس و سپتامبر با افزایش ماکزیمم میانگین ماهیانه سرعت باد، ماکزیمم میانگین ماهیانه سرعت جریان سطحی نیز افزایش می‌یابد. تغییرات ایجاد شده در میانگین سرعت جریان در این دو ماه به علت قرارگیری ماکزیمم سرعت باد بر روی نواحی با عمق بالا در ماه‌های فوریه و

جدول ۱- مقادیر ماکزیمم میانگین ماهیانه سرعت باد و جریان

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

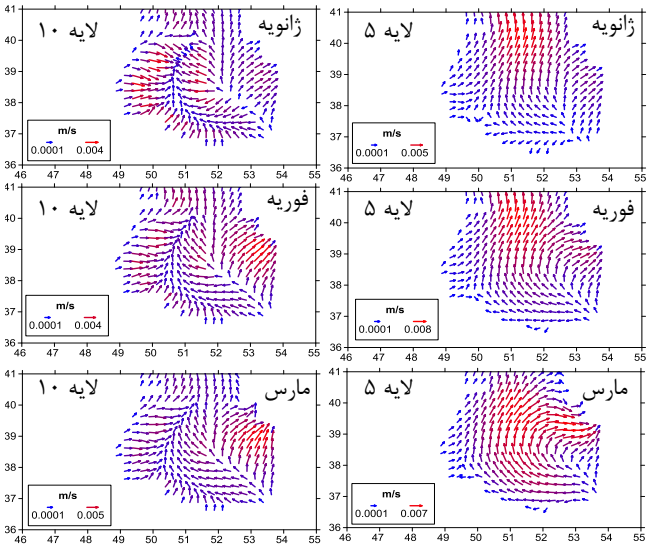
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]

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 تاثیرپذیری 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 قرار گیری 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.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جریانات بادرانده در خزر جنوبی با استفاده از طراحی و توسعه یک مدل عددی سه بعدی باروکلینیکی 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 تاثیرات 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 تاثیرات 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 تاثیرات 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 لایه‌میانی 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 REgioNal 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]

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 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 sinopticheskih techeniy Kaspiiskogo morya v letniy sezon po rezultatam diagnosticheskih raschetov*, in: Kaspiiskoe more. Struktura i dinamika vod, edited by: Kosarev, A. N., Nauka, Moscow, USSR, 5–15.

11- Badalov, A. B. and Rzheplinski, D. G., (1989), *Modelirovanie dinamiki deyatelnogo sloya Kaspiiskogo morya pod deystviem sinopticheskih atmosfernyh prosessov*, in: Modelirovanie gidrofizicheskih prosessov i poley v zamknutyh vodoemah i moryah, Nauka, Moscow, edited by: Sarkisyan, A. S., USSR, 31–51.

12- Sarkisyan, A. S., Zaripov, R., Kosarev, A. N., and Rzheplinski, D. G., (1976), *Diagnosticheskie 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. CJ., (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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.9.7]