

## اندرکنش تاثیرات تبخیر، بارش و ورودی رودخانه‌ها در مدل‌سازی حجم محدود جریان‌های افقی روی بستر سه بعدی دریای خزر

سعیدرضا صباغ یزدی<sup>۱</sup>، عطا... مومنی هروی<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی عمران

۲- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۸۹، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

### چکیده

در این تحقیق مدل‌سازی جریان‌های افقی بر روی بستر سه بعدی دریای خزر با لحاظ نمودن زبری بستر در کنار تأثیرات ورودی از رودخانه‌ها، بارش، تبخیر و در مناطق مختلف انجام شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر توانایی مدل‌سازی پارامترهای مهم تأثیرگذار بر شبیه‌سازی در دریای خزر است. در ماجول مورد استفاده از نرم‌افزار *NASIR*، دسته معادلات آبهای کم‌عمق (با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک) به عنوان مدل ریاضی دوبعدی اختیار شده است. این معادلات شامل دو معادله حرکت در صفحه افق و یک معادله پیوستگی است. در این کار تأثیر ورود آب رودخانه‌ها و برآیند بارش و تبخیر آب از سطح این دریا و همچنین ورودی از رودخانه‌ها به‌عنوان عبارت‌های چشمه و چاه معادله پیوستگی دیده شده‌اند. در حل معادلات حرکت، اثرات زبری کف و تنش‌های ناشی از آشفتگی دیده می‌شوند. روش حل عددی در این مدل، روش حجم محدود است. مدل‌سازی هندسه در این کار به کمک شبکه بی‌ساختار مثلثی انجام شده است تا بتوان نامنظمی‌های سواحل دریا را بخوبی مدل نمود. تبدیل شبکه دوبعدی به یک صفحه سه‌بعدی با استفاده از ترازهای مستخرج از نقشه دارای خطوط تراز انجام شده است. در این کار تأثیر تغییرات شدید عمق بر کیفیت نتایج تراز سطح آب محاسبه شده است و اثر ورودی رودخانه‌ها بر چرخه‌های افقی جریان در دریای خزر نیز بررسی می‌گردد. نتایج مدل به کمک خطوط جریان بدست آمده از محاسبه بردارهای سرعت در نقاط گرهی و نمودارهای تغییرات تراز سطح آب مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

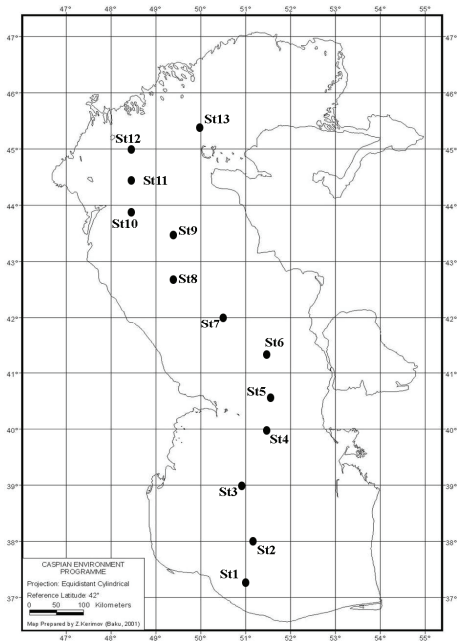
کلمات کلیدی: تاثیر بارش، تبخیر و رودخانه‌ها، جریان‌های افقی دریای خزر، بستر سه‌بعدی، مدل حجم محدود *NASIR*

### ۱. مقدمه

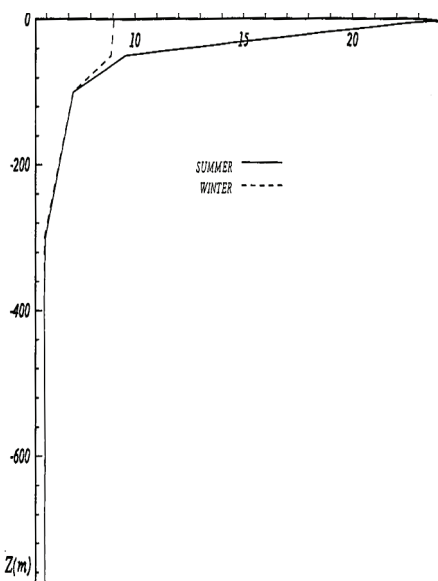
۱۳۷۱؛ دارایی، ۱۳۷۲؛ خوش‌اخلاق، ۱۳۷۴). در حال حاضر خوشبختانه با وجود رایانه‌های پر قدرت و پیشرفت تکنیک‌های نرم‌افزاری، ساخت و اجرای مدل‌های عددی، امکان منظور نمودن بسیاری از عوامل را در شبیه‌سازی رایانه‌ای فراهم آورده است. در مدل‌های عددی جدید حجم محدود قدرت مدل‌سازی عوامل موثر بر مسأله بسیار بالا رفته است و با کمک شبکه‌های بی‌ساختار می‌توان پیچیدگی‌های هندسی مسأله را با همان ابعاد

عوامل مؤثر بر جریان‌ات دریایی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد: گروه اول عوامل ثابت شامل اثرات هندسه مسأله شامل هندسه سواحل بعلاوه توپوگرافی و زبری بستر و گروه دوم عوامل متغیر شامل تأثیر تغییر درجه حرارت، میزان تبخیر و بارش، دبی ورودی رودخانه‌ها و اثرات آشفتگی است (امینی،

واقعی خود شبیه‌سازی نمود. در گذشته در مدلسازی جریان افقی دریای خزر، بدون منظور نمودن تغییرات توپوگرافی بستر انجام شده و تاثیر مهم اندرکنش عواملی چون نامنظمی‌های سواحل دریا، تفاوت بارش و تبخیر سالانه، جریان ورودی رودخانه‌ها انجام شده است (صباغ‌یزدی، ۱۳۸۴). در کار قبلی اثر ورود آب از رودخانه‌ها به صورت سرعت اعمال شده عمود بر مرز منظور شده بود و مدل به صورت دوبعدی و با در نظر گرفتن عمق میانگین بر روی یک بستر افقی با اجرا درآمد (صباغ‌یزدی، ۱۳۸۴).



شکل ۱- نقاط اندازه‌گیری دمای آب در گشت‌های دریائی (زمردیان، ۱۳۷۷)



شکل ۲- نمودار دمای میانگین در اعماق مختلف دریای خزر از مشاهدات گشت دریائی در فصل تابستان و زمستان (زمردیان، ۱۳۷۷)

## ۲. شیوه شبیه‌سازی

در این تحقیق، حل عددی مدل ریاضی جریان به کمک روش حجم محدود مناسب شبکه بی‌ساختار (مثلثی) به‌عنوان شیوه

در گذشته در مدلسازی جریان افقی دریای خزر، بدون منظور نمودن تغییرات توپوگرافی بستر انجام شده و تاثیر مهم اندرکنش عواملی چون نامنظمی‌های سواحل دریا، تفاوت بارش و تبخیر سالانه، جریان ورودی رودخانه‌ها انجام شده است (صباغ‌یزدی، ۱۳۸۴). در کار قبلی اثر ورود آب از رودخانه‌ها به صورت سرعت اعمال شده عمود بر مرز منظور شده بود و مدل به صورت دوبعدی و با در نظر گرفتن عمق میانگین بر روی یک بستر افقی با اجرا درآمد (صباغ‌یزدی، ۱۳۸۴).

در مقاله حاضر سعی شده است تا علاوه بر تاثیر میزان بارش و تبخیر سالانه و جریان ورودی رودخانه‌ها، تغییرات توپوگرافی بستر و تنش‌های ناشی از آشفتگی در مدلسازی جریان‌های افقی دریای خزر منظور و تاثیر ورود آب رودخانه‌ها به صورت چشمه‌های نقطه‌ای در گره‌ای مجاور مرز در نظر گرفته شود. در ویرایشی از نرم‌افزار *NASIR* که در کار حاضر مورد استفاده قرار گرفته است (صباغ‌یزدی، ۱۳۷۹)، معادلات آب‌های کم‌عمق، معادلات اصلی مورد استفاده در مدلسازی جریان‌های افقی هستند (Thompson, 1999). این معادلات نیز از انتگرال‌گیری روابط ناویه - استوکس در عمق و اعمال شرایط مرزی سطح و بستر به دست آمده‌اند.

یکی از پارامترهای مهم برای شبیه‌سازی جریان در دریا تغییرات درجه حرارت در اعماق مختلف است. در دو گشت دریایی بر روی دریای خزر در ایستگاه‌های مختلف (شکل ۱) در اواخر فصل تابستان و زمستان سال ۱۳۷۴ توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی با همکاری سازمان یونسکو و کشورهای مجاور دریای خزر انجام شد (زمردیان، ۱۳۷۷)، که میانگین تغییرات درجه حرارت در بخش‌های مختلف دریای خزر مطابق (شکل ۲) است.

با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که تغییرات شدید درجه حرارت تنها در ۲۰ تا ۳۰ متری اولیه از سطح دریای خزر اتفاق می‌افتد. با توجه به نسبت بسیار کم این لایه نسبت به اعماق دریای خزر در بخش‌های مختلف تاثیر این پارامتر در ایجاد جریان‌های قائم در دریای خزر ناچیز است. پس می‌توان از فرض غالب بودن جریان‌های افقی (دوبعدی) که عمدتاً ناشی از اندرکنش تبخیر و بارش با جریان‌های ورودی از رودخانه‌ها می‌باشد در مدلسازی عددی بهره جست. هدف این تحقیق بررسی تاثیر میزان تبخیر و بارش و جریان ورودی رودخانه‌های مهم منتهی به دریای خزر در شبیه‌سازی جریان با کمک حل حجم

$$E^d = \begin{bmatrix} 0 \\ hv_{th}2(\frac{\partial u}{\partial x}) \\ hv_{th}(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) \end{bmatrix}, F^d = \begin{bmatrix} 0 \\ hv_{th}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) \\ hv_{th}2(\frac{\partial v}{\partial y}) \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} \pm q_z \\ -gh\frac{\partial z_s}{\partial x} + hvf_c - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \\ -gh\frac{\partial z_s}{\partial y} - huf_c - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در این معادلات،  $\delta z$  معرف میزان تبخیر و بارش در همه نقاط و نیز حجم ورودی رودخانه‌ها در نقاط متناظر با اتصال رودخانه به دریا، پارامتر  $t$  معرف زمان و  $x$  و  $y$  مختصات دکارتی نقطه و  $\rho$  جرم‌حجمی آب و  $h$  عمق جریان و  $u$  و  $v$  بردارهای میانگین عمقی سرعت،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $S$  نشان‌دهنده اثرات حجم آب ورودی از نقاط مرزی آن مانند جریان ورودی رودخانه‌ها به دریای خزر یا حجم آب ورودی و خروجی از سطح آن مانند بارش و تبخیر هستند. در معادلات بالا،  $z_s = h + z_b$  تراز سطح آب است که از جمع تراز بستر  $z_b$  با عمق آب  $h$  در هر نقطه قابل محاسبه است. تنش برشی ناشی از زبری کف در جهت  $x$  و  $y$  و  $\tau_{bx} = \rho_w c_f u |u|$  و  $\tau_{by} = \rho_w c_f v |v|$  برابر با ضریب مقاومت بستر در دو جهت  $x$  و  $y$  است.

$c_f = n^2 g / h^{0.333}$  برابر عمق جریان و  $n$  برابر با ضریب مانینگ است). نیروی ناشی از چرخش کره زمین (کریولیس) جغرافیایی و  $\omega$ ، سرعت زاویه‌ای کره زمین در اثر دوران حول محور قائم خود (قطب شمال) که معادل  $4\pi$  رادیان ( $1.45 \times 10^{-4}$ ) است (Costaned, 2005).

در روابط فوق  $v$  ضریب لزجت سینماتیکی و  $v_r$  لزجت گردابه‌ای ناشی از آشفتگی جریان است. برای مدل‌سازی لزجت آشفتگی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به روشهای زیر اشاره نمود: روش مدل جبری میانگین عمقی (Sabbagh Yazdi, 2008)، و مدل پیشنهادی برای جریان‌های با سطح آزاد (Wu, 2004)، مدل  $K - \epsilon$  (Yakhot, 1992). در کار حاضر روش مدل جبری میانگین برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است که در آن  $v_r = cu^* h$  که در آن  $u^*$  سرعت برش بر اساس زبری بستر می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:  $u^* = \sqrt{c_f(u^2 + v^2)}$  و ضریب  $c$  در مدل‌های آزمایشگاهی بین ۰/۱ تا ۰/۳ برای شرایط مختلف تعیین شده است (Smagorinsky, 1963).

## ۲.۲ فرمول‌بندی حجم محدود

پس از جایگزینی معادلات حاکم در رابطه کلی روش احجام

شبه‌سازی انتخاب شده است. معادلات پیوستگی و حرکت در صفحه افق به شکل آب‌های کم‌عمق که از انتگرالگیری شکل تراکم‌ناپذیر معادلات ناویه - استوکس در عمق و اعمال شرایط مرزی سطح و بستر به دست آمده‌اند، به‌عنوان مدل ریاضی مسئله انتخاب شده است. تاثیر میزان تبخیر و بارش و دبی ورودی رودخانه‌های مهم منتهی به دریای خزر (جدول ۱) در عبارت منبع معادله پیوستگی منظور شده است. بر اساس آمار بدست آمده در سالهای مختلف رودخانه ولگا حدود ۸۰٪ حجم آب ورودی به دریای خزر را به خود اختصاص داده است و این در حالی است که رودخانه‌های منتهی به دریای خزر از سواحل ایران تنها ۵٪ حجم آب ورودی به دریای خزر را به خود اختصاص می‌دهند (امینی، ۱۳۷۱).

جدول ۱- میزان ورودی و خروجی از دریای خزر [۱]

متوسط ورودی سالانه از رودخانه‌ها (کیلومتر مکعب)	ورودی و خروج از سطح آب (میلی‌متر)	
ولگا (Volga)	تبخیر	بارش
۲۸۰	۹۸۸	۱۹۱
آرال (Ural)		
۲۵		
تری (Trak)		
۲۵		
آرس (Aras)		
۵		
سایرود (Sairoud)		
۵		
هراز (Haraz)		
۵		
آتری (Atrak)		
۵		

در این کار، مدل‌سازی هندسه در دریای خزر به کمک اختصاص تراز بستر به نقاط گرهی شبکه بی‌ساختار مثلثی انجام شده است. از این طریق، نامنظمی‌های سواحل دریا و شکل هندسی صفحه سه بعدی بستر دریا بخوبی مدل شده است.

## ۱.۲ مدل ریاضی

با توجه به توضیحات ارائه شده، می‌توان از پارامترهای مهم دبی ورودی رودخانه‌ها، تبخیر، بارش، شتاب ناشی از چرخش کره زمین در معادلات دو بعدی برای شبه‌سازی جریان در دریای خزر استفاده نمود. معادلات مورد استفاده در این مدل معادلات پیوستگی و حرکت انتگرال‌گیری شده در عمق هستند (Costaned, 2005).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \left( \frac{\partial E^c}{\partial x} + \frac{\partial F^c}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial E^d}{\partial x} + \frac{\partial F^d}{\partial y} \right) + S \quad (۱)$$

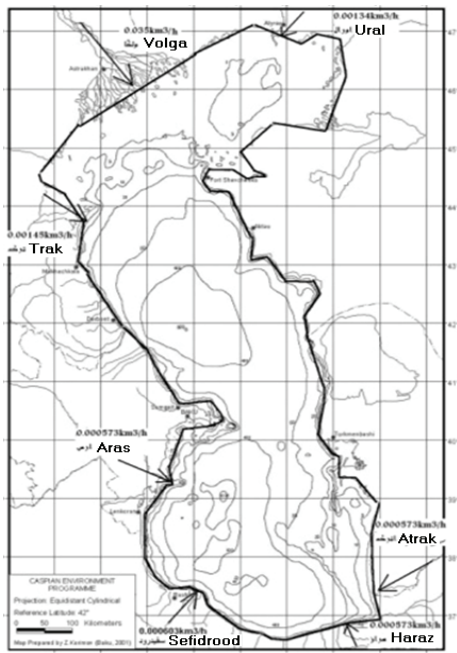
$$H = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, E^c = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \end{bmatrix}, F^c = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

محدود و انتگرال‌گیری از آن بر روی سطح و سپس گسسته‌سازی معادلات چنین می‌شود (Thompson, 1999).

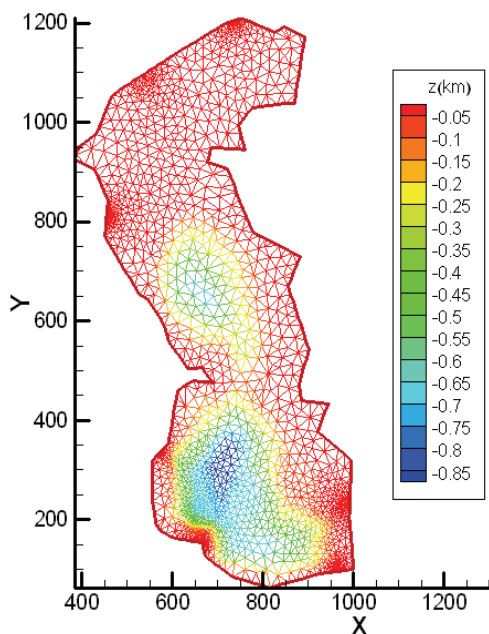
$$H^{n+1} = H^n + \frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{k=1}^N \left[ (\bar{E}^c \Delta y - \bar{F}^c \Delta x) - (\tilde{E}^d \Delta y - \tilde{F}^d \Delta x) \right]_k + S'_k \Delta t \quad (4)$$

که در آن  $\Delta t$  گام زمانی حل معادلات و  $\Omega$  برابر سطح حجم کنترل مورد نظر است.  $S$  شامل مقادیر چشمه و چاه معادلات است که در مرکز حجم کنترل مورد محاسبه قرار می‌گیرد و  $\bar{E}^c$  و  $\bar{F}^c$  مقدار شارهای انتقالی و فشار هیدرواستاتیک در دو راستای  $x$  و  $y$  هستند که در وسط هر یال محاسبه می‌شوند و  $\tilde{E}^d$  و  $\tilde{F}^d$  شارهای پخش در دو راستای  $x$  و  $y$  هستند که به صورت ذیل محاسبه می‌شوند.

$$E^d = v_r h \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right] \approx v_r h \left[ \frac{1}{A} \sum_{k=1}^N \bar{u} \Delta y \right] \quad F^d = v_r h \left[ \frac{\partial u}{\partial y} \right] \approx v_r h \left[ -\frac{1}{A} \sum_{k=1}^N \bar{u} \Delta x \right] \quad (5)$$



شکل ۳- خطوط تراز بستر دریای خزر و موقعیت رودخانه‌های اطراف آن



شکل ۴- هندسه شبکه بستر دریای خزر

### ۳. نتایج مدل‌سازی

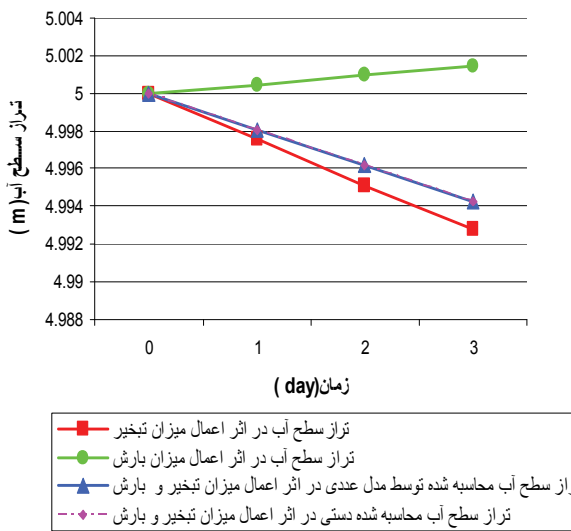
برای شبیه‌سازی جریان در دریای خزر، اجرای مدل در چند مرحله در حالت اعمال دبی ورودی رودخانه‌ها، تبخیر، بارش، شتاب کریولیس و تنش ناشی از زبری کف در مدت زمان سه شبانه‌روز انجام شد. براساس آمار موجود در سالهای گذشته

در حل صریح جریان‌های غیرلزج و یا جریان‌هایی که در آنها مقاومت فیزیکی ناشی از زبری بستر ناچیز است، خطاهای عددی به صورت ناخواسته رشد می‌کنند. در این کار برای غلبه بر این نوسانات و جهت پایداری روند حل و تضمین روند همگرایی جوابها، اضافه کردن عبارات‌های استهلاک مصنوعی توانست مفید واقع شود. استهلاک مصنوعی از عبارات‌های لاپلاسیان و بای هارمونیک تشکیل شده است (Thompson, 1999).

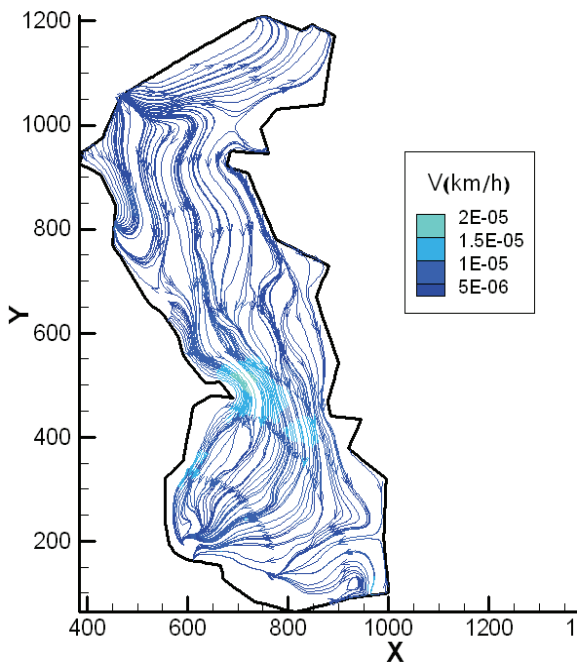
### ۳.۲ مدل‌سازی هندسی

داده‌های موجود در سایت etopo2 که نشان‌دهنده خطوط هم تراز بستر دریای خزر هستند، در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای ایجاد شبکه مدل از شبکه‌های بدون ساختار مثلثی استفاده شده است، که برای ایجاد مثلث‌های داخلی شبکه روش بسیاری وجود دارند که در اینجا از روش دلوانی استفاده شده است (Vreugdenhil, 1994). با توجه به پیچیده بودن تولید شبکه‌های بدون ساختار، برای ایجاد شبکه منحنی‌های مرزی استفاده شده و برای ایجاد و تبدیل شبکه دو بعدی (صباغ‌یزدی، ۱۳۸۴) به شبکه سه بعدی، تراز نقاط گرهی شبکه از درون‌یابی بین خطوط تراز محاسبه شده‌اند. شبکه سه بعدی تولیدشده شامل ۲۲۵۵ نقطه گرهی و ۴۰۷۷ المان مثلثی است (شکل ۴).

رودخانه ولگا که ۸۰٪ حجم آب ورودی رودخانه‌ها را مطابق با جدول (۱) به خود اختصاص می‌دهد، در نظر گرفته شد. خطوط جریان شکل گرفته از نتایج شبیه‌سازی عددی مطابق شکل (۷) می‌باشد. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌شود خطوط جریان حرکتی در دریای خزر، تحت تاثیر تبخیر شدید از سطح آب و دبی ورودی رودخانه ولگا به دلیل حجم آب ورودی بسیار زیاد رودخانه ولگا، از سمت شمال به جنوب دریای خزر است.



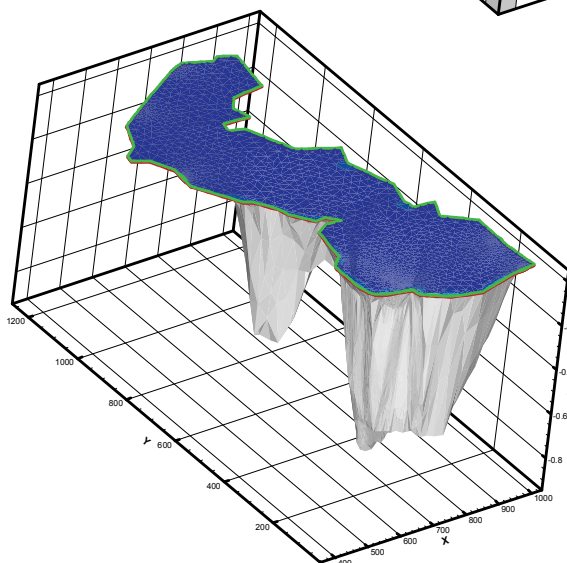
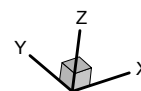
شکل ۶- تراز سطح آب بر اثر بارش، تبخیر و بارش+ تبخیر در مدت زمان سه روز



شکل ۷- خطوط حرکت جریان بر اثر دبی ورودی رودخانه ولگا به دریای خزر پس از گذشت سه روز

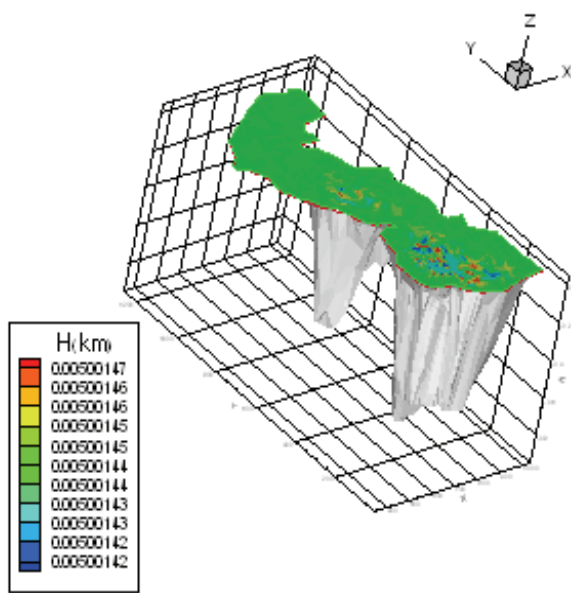
میانگین میزان تبخیر و بارش در دریای خزر به ترتیب برابر ۹۸۸ و ۱۹۱ میلی‌متر در سال و میانگین حجم آب ورودی رودخانه‌ها برابر ۳۵۰ کیلومتر مکعب در سال در نظر گرفته شد (امینی، ۱۳۷۱). کلیه محاسبات زیر با در نظر گرفتن اثر تاثیر زبری یکنواخت و تغییرات توپوگرافی بستر صورت گرفته است.

در مرحله اول مدل تنها تحت تاثیر میزان تبخیر و بارش با اعمال این اثرات در کم کردن یا اضافه نمودن دبی حجمی متناسب با سطح حجم کنترل متناظر با نقاط گرهی (بعنوان چاه و چشمه معادله پیوستگی) انجام گردید. در این کار مدل‌سازی جریان در دریای خزر در مدت زمان سه شبانه‌روز و با فرض تراز سطح آب اولیه مطابق شکل (۵) برای چندین الف - حالت تبخیر به تنهایی، ب - بارش به تنهایی و ج - بارش و تبخیر توأم انجام گردید. کنترل نتایج مدل‌سازی عددی با محاسبات دستی تغییرات تراز سطح آب ناشی از اثرات تبخیر و بارش (شکل ۶) نشان از روند منطقی نتایج مدل‌سازی عددی در طی تکرار گام‌های زمانی کوچک در مدت سه روز است.

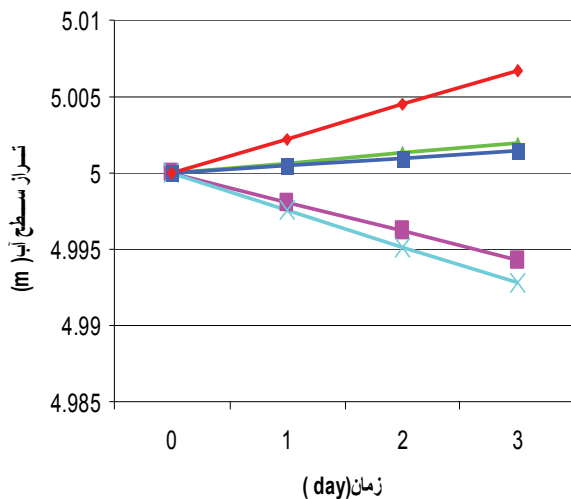


شکل ۵- شرایط اولیه تراز سطح آب قبل از اجرای محاسبات توسط مدل عددی

در مرحله دوم مدل‌سازی تحت تاثیر حجم آب ورودی رودخانه (جدول ۱ و شکل ۳) در کنار منظور نمودن اثرات توأم تبخیر و بارش و نیز تنش‌های کلی ناشی از زبری کف مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار تاثیرات ورود آب رودخانه‌ها به صورت چشمه‌های نقطه‌ای در گره‌های مجاور مرز در نظر گرفته شدند. ابتدا



شکل ۹- تغییرات تراز سطح آب (به کیلومتر) بر اثر دبی ورودی رودخانه‌ها، تبخیر و بارش روی بستر سه‌بعدی پس از گذشت سه روز

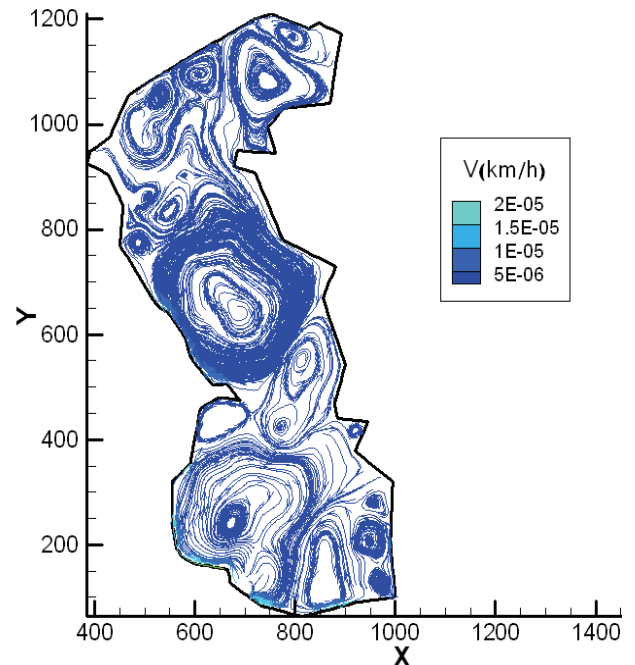


شکل ۱۰- تراز سطح آب (به کیلومتر) بر اثر اعمال پارامترهای ذکر شده در طول مدت زمان سه روز

#### ۴. نتایج و بحث

ویرایش مورد استفاده از نرم‌افزار *NASIR*، که معادلات میانگین عمقی جریان انتگرال‌گیری شده در عمق را بر روی شبکه بی‌ساختار مثالی حل می‌نماید، قادر است پیچیدگی‌های هندسی سواحل را

برای مدل‌سازی دقیق‌تر خطوط جریان حرکتی در دریای خزر، در مرحله بعد مدل‌سازی تاثیر شش رودخانه مهم دیگر منتهی به دریای خزر (شکل ۸) نیز علاوه بر رودخانه ولگا در نظر گرفته شد.



شکل ۸- خطوط حرکت جریان بر اثر دبی ورودی هفت رودخانه مهم منتهی به دریای خزر پس از گذشت سه روز

خطوط جریان شکل گرفته از محاسبات جریان روی بستر زبر سه بعدی تحت تاثیر هفت رودخانه مهم در دریای خزر با استفاده از جدول (۱) بر شکل (۸) منطبق است.

با مقایسه اشکال (۷) و (۸) ملاحظه می‌شود که اعمال دبی ورودی هفت رودخانه مهم منتهی به دریای خزر خطوط جریان در بخشهای مختلف دریای خزر را تحت تاثیر خود قرار داده است.

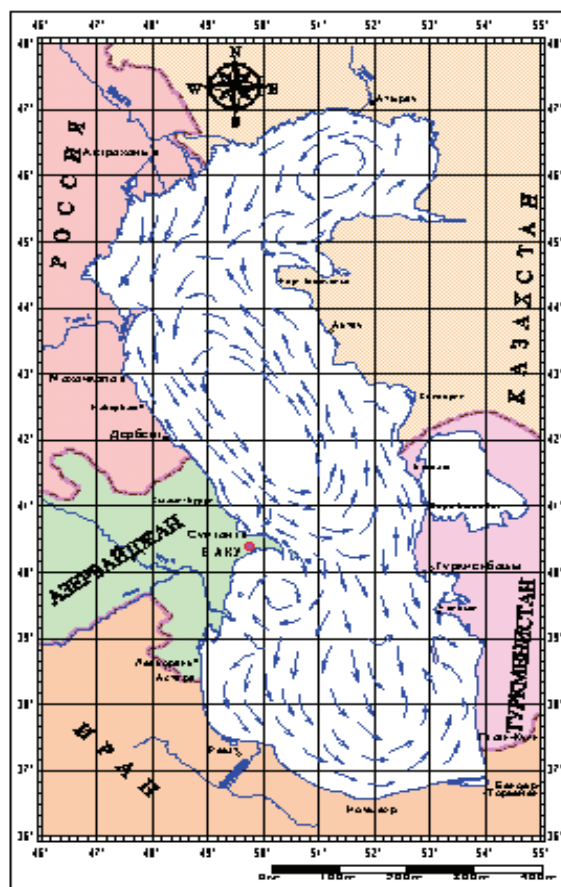
شکل (۹) تراز سطح آب محاسبه شده پس از سه روز را نشان می‌دهد و نمودار (۱۰) بیانگر مقایسه تغییرات تراز سطح آب در دریای خزر تحت تاثیر اعمال میزان تبخیر، بارش و دبی ورودی رودخانه‌ها در مدت زمان سه شبانه‌روز است. همانگونه که مشاهده می‌شود، اختلاف تراز سطح آب در اثر اعمال هریک از پارامترها به تنهایی و اعمال همزمان آنها قابل مشاهده است.

نتایج مدل‌سازی عددی این آزمون‌ها برای مدت کوتاه سه روزه نشان دادند که میزان تبخیر نقش مهمی را در کاهش تراز سطح آب در دریای خزر ایفا می‌کند و حجم آب ورودی از رودخانه‌ها این کاهش را جبران می‌نماید. از طرف دیگر، اگرچه با توجه به حجم آب ورودی بسیار زیاد رودخانه ولگا که حدود ۸۰٪ حجم آب ورودی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر به خود اختصاص می‌دهد، اعمال حجم آب ورودی رودخانه‌های پیرامون دریای خزر نقش بسیار مهمی را در شکل‌دهی جهت جریان در دریای خزر ایفا می‌کنند. مشابهت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی حاضر با مشاهدات گزارش شده از جریان‌های دریایی دریای خزر (شکل ۱۱) به‌علاوه توانایی‌های مدل عددی به‌کار گرفته شده در این کار، توسعه و کاربرد عملی آنرا در حل مسایل فیزیک و مهندسی دریای خزر تشویق می‌نماید.

#### منابع

- امینی، ع: ۱۳۷۱. طبقه‌بندی دریا و دریاچه‌ها براساس عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب. مجموعه مقالات نوسانات آب دریای خزر. خوش اخلاق، ف: ۱۳۷۴. نگرش کوتاه بر برخی ویژگی‌های طبیعی دریای خزر. مقاله پژوهشی معاونت پژوهشی دانشگاه گیلان.
- دارایی، ن: ۱۳۷۲. خزر دریایی که باید آنرا شناخت. معاونت پژوهشی دانشگاه گیلان.
- زمردیان، ح؛ شیخ‌الاسلامی، م: ۱۳۷۷. نحوه توزیع دما. شوری و چگالی در آبهای عمیق دریای خزر با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده در دو گشت دریایی ۱۳۷۴ و ۱۳۷۵. مجله اقیانوس‌شناسی. جلد یکم. صفحه ۲۵-۳۹.
- صباغ یزدی، س: ۱۳۷۹. بررسی تاثیر نیروی کریلیوس بر جریانات دریای خزر با کمک یک مدل عددی دو بعدی. پنجمین کنفرانس بین‌المللی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی. صفحه ۲۴-۲۹.
- صباغ یزدی، س: ۱۳۸۴. معرفی نرم‌افزار *NASIR* برای حل احجام محدود مسایل مهندسی انتقال حرارت و جریان سیالات و محیط زیست. گزیده مقالات سمینار کاربرد شبیه‌سازی رایانه‌ای در مهندسی عمران. دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. صفحه ۱۹.
- Castanedo, S.; Medina, R.; and Mendez, F.J: 2005. Models for the turbulent diffusion terms of shallow water equation. *Journal of Hydraulic. ASCE.* 131(3):217-223.
- Sabbagh-Yazdi, S.R.; and Zounemat-Kermani, M: 2008.

بخوبی مدل نماید. شبکه مثلثی مورد استفاده در این مدل که به صورت یک صفحه سه بعدی در آمده است، امکان مدل‌سازی تغییرات شدید توپوگرافی بستر را به دست می‌دهد. به‌طور کلی از نتایج کار حاضر می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با استفاده از نرم‌افزار مورد اشاره برای مدل‌سازی عددی به شیوه تشریح شده در این مقاله می‌توان علاوه بر منظور نمودن اثرات زبری بستر سه بعدی تاثیرات بارش و تبخیر و و ورودی از رودخانه‌ها را بخوبی مدل نمود. نتایج محاسبه شده توسط مدل عددی نشان‌دهنده تغییرات تقریباً هم‌تراز در کل سطح آب دریا است. اگرچه نوساناتی ناچیز در سطح آب محاسبه شده بروز نمود که عمدتاً به دلیل تغییرات عمق شدید در نواحی عمیق شدن ناگهانی دریا (از حدود ۳۰ متر به نزدیک ۱۰۰۰ متر) است. اما به‌طور کلی، با توجه به اینکه محاسبات حجمی دستی، عدم ورود خطا در محاسبات رایانه‌ای را طی گامهای زمانی کوچک متوالی نشان داد، مدل عددی یاد شده برای بررسی تغییرات تراز سطح آب و شبیه‌سازی جریان‌های دریایی تحت تاثیر عوامل مذکور آزموده شد.



شکل ۱۱- خطوط حرکت جریان در دریای خزر (گزارش شده در سایت [caspianto-facts.com](http://caspianto-facts.com))

- water flow. Kluwer Academic Publisher. Utrecht. the Netherlands.
- Wu, W: 2004. Depth Averaged two-dimensional numerical modeling of steady flow and non-uniform sediment transport in open channels. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 130(10):1013-1024.
- Yakhot, V.; Orzag, S.A.; Thangam, S.; Gatski, T.B.; and Special, C.G: 1992. Development of turbulent model for shear flows by a double expansion technique, Phys. Fluids A. 4(7):1510-1520.
- Vertex base unstructured finite volume solution of depth averaged turbulent tidal currents on 3D bed, Iranian Journal of Science & Technology. Transaction B: Engineering. 13(B5):563-570.
- Smagorinsky, J: 1963. General circulation experiments with the primitive equation. Part I: The Basic Experiment. Monthly Weather Review. 91:99-152.
- Thompson, J.F.; Soni, B.K.; and Weatherill, N.P: 1999. Hand Book of Grid Generation. CRC Press.
- Vreugdenhil, C.B: 1994. Numerical methods for shallow