

## بررسی اولیه مدل سه بعدی جریان در دریای خزر

محمدرضا بنزاده\*، علی اکبر بیدختی\*\*، محمد خیراندیش\* و هادی فدوی حسینی\*  
دانشکده علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده ژئوفیزیک، دانشگاه تهران  
دانشکده آزاد اسلامی واحد تهران شمال، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

(دریافت مقاله: ۷۸/۱۱/۳۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۴/۲۶)

**چکیده:** این مقاله یک کار مقدماتی از بررسی و تحلیل یک مدل سه بعدی جریان است که در یک تفکیک شبکه متغیر در جهت عمودی انجام گرفته است. اطلاعات از ایستگاههای هواشناسی اطراف دریای خزر و تنش باد و میدان فشار از اطلاعات ثبت شده در ایستگاههای سینوپتیکی استفاده شده است. مشاهدات از دریای خزر با توجه به اطلاعات نسبتاً جامع از گشت دریایی سال ۱۳۷۴ در ماههای شهریور و مهر، توسط یک کشتی تحقیقاتی متعلق به بخش هیدرولوژی سازمان هواشناسی آذربایجان و حمایت آژانس بین المللی انرژی اتمی و با مشارکت کشورهای حاشیه دریا، با نمونه برداری از ۱۳ ایستگاه انجام پذیرفت. این دوره به این دلیل انتخاب شد که یک مجموعه ای از داده‌ها از گشت دریای خزر در همان زمان در دسترس است. نتایج مدل براساس آن مشاهدات و گزارشات موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است. با بررسی وضعیت جریان در چند لایه به بررسی سرعتها و دما در سه برش در حوزه جنوبی، میانی و شمالی می پردازیم. نتایج وجود سلولهای گردشی را در سه ناحیه فوق نشان می دهد و اینکه گردش با عمق به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. تغییرات دما در لایه‌های مختلف و در برشهای مشخص شده با مشاهدات همخوانی نسبتاً قابل قبولی دارد. این کار اولین کوشش برای مدل کردن ساختار جریان و دما به صورت عددی در ایران است که به بررسی و تحلیل یک مدل سه بعدی جریان و ساختار دما می پردازد.

واژگان کلیدی: گردش، درجه حرارت، مدل عددی، تاوایی، تنش باد

## A Three-Dimensional Model of the Caspian Sea

M. R. Bannazadeh, A. A. Bidokhti, M. Kherandish and H. F. Hosseni

**Abstract:** *Observations of the Caspian Sea during August-September 1995 are used to develop a three-dimensional numerical model to be used in calculating temperature and current. The model has variable grid resolution and horizontal smoothing that filters out small scale vertical motion. Data from the meteorological buoy network on the Caspian Sea are combined with routine observations at first-order synoptic station around the lake to obtain hourly values of wind stress and pressure fields. The hydrodynamic model of the Caspian Sea has 6 vertical levels and a uniform horizontal grid size of 50 km. The model is driven with surface fluxes of heat and momentum derived from observed meteorological data. The model was able to reproduce all the basic features of the thermal structure in the Caspian Sea and larger-scale circulation patterns tended to be anticyclone, with anticyclone circulation with in each sub-basin. The results matched observation data.*

**Keywords:** *Circulation, Temperature, Numerical model, Vorticity, wind stress*

\*\* - دانشیار

\* - استادیار

$x, y, z$	مختصات کارتیزین، $m$ ، $z$ مثبت به طرف پایین)	$\rho$	دانسیته، $Kg/m^3$
$u, v, w$	مؤلفه‌های سرعت، $M/s$ ، $w$ مثبت به طرف پایین)	$\psi$	تابع جریان، $m^2/s$
$h(x, y)$	عمق دریای خزر، $m$	$\psi_L$	تاوایی شارش
$P$	فشار، منهای فشار سطح $P_a$	$K$	پخش ادی عمودی، $m^2/s$
$P_s$	فشار سطح، $P_a$	$A$	لزجت ادی عمودی، $m^2/s$
$T$	دما، $^{\circ}C$	$\tau_w$	استرس عمودی، $N/m^2$
$b(T)$	شناوری، $m/s^2$	$Ri$	عدد ریچاردسون، بدون بعد
$\rho^{\circ}$	دانسیته آب خالص، $Kg/m^3$		

### ۱- مقدمه

مدلهای عددی که فقط هندسه دریاچه را در نظر می‌گرفت و قادر به پیشگویی نمونه‌های گردش برای جهت‌های متفاوت باد بود، توسط هامبلین ۱۹۶۷ شروع و تا سال ۱۹۷۲ توسط دیگران ادامه و توسعه داده شد [۹]. مسئله وابسته به زمان بودن گردش و ویژگی‌های از جمله چرخش، توزیع عمودی جریان، ساختار عمودی دما و ترموکلاین نیز توسط کسندی<sup>۲</sup>، سیمونس<sup>۳</sup>، بنت<sup>۴</sup> و شووب<sup>۵</sup> بررسی و کامل شد. این مدلها بیشتر بر روی دریاچه‌های انتریو<sup>۶</sup>، ایری<sup>۷</sup> و میشیگان<sup>۸</sup> مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱، ۳، ۴، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳].

اولین مدل‌های عددی سه بعدی از گردش و ساختار دما به صورت یک ترکیبی از دو لایه یا بیشتر با در نظر گرفتن مبادلات بین سطوح توسط لی و لیجیت<sup>۹</sup>، بنت و شووب استفاده و توسعه داده شد که تکنیکهایی را در نحوه مدل کردن ساختار گردش و ساختار دما در دریاچه‌ها نشان می‌داد. کسندی، بنت و سیمونس به طور گسترده در اقداماتی هماهنگ درکی از محدودیتها و پایداری از این مدلها را در بررسی تحلیلی و شبه تحلیلی<sup>۱۰</sup> ارائه دادند که در کارهای بعدی آنها و همچنین محققان دیگر روی مدل کردن دریاچه‌ها، مورد استفاده قرار گرفت [۲، ۳، ۵، ۱۲ و ۱۳].

با توجه به نتایج حاصل از کارهای فوق در صحت و پایداری مدل، یک مدل عددی سه بعدی برای دریای خزر بررسی شد.

این کار یک نظریه مستقل از زمان<sup>۱۱</sup> است که می‌تواند جریانهای ناشی از باد<sup>۱۲</sup> را در دریاچه‌های بزرگ نشان دهد. فیزیک پایه می‌تواند به خوبی برای دریاچه‌های بزرگ و نواحی فلات قاره<sup>۱۳</sup> به کار رود [۲، ۱۲ و ۱۳]. یک دلیل مدل کردن گردش در دریاچه خزر مشکل فقدان مشاهدات است که بتوان هم گردش و هم نیروهای حاکم بر آنها و نیروهای به وجود آورنده را به خوبی مشخص کرد. شبکه‌های انتخاب شده در سطح افق برای لایه‌های مختلف یکسان است،  $\Delta x = \Delta y$ . فقط تغییرات شبکه‌های عمودی با توجه به وضعیت توپوگرافی دریاچه خزر در نظر گرفته شده است. توپوگرافی دریاچه خزر را با توجه به تقسیم شدن آن به سه ناحیه شمالی، مرکزی، جنوبی و در نظر گرفتن پشته جدا کننده بخش مرکزی و جنوبی شبکه بندی کرده ایم. لایه اول و دوم ۵۰ متر اختیار شده است و لایه سوم دارای یک عمق ۱۰۰ متر که تقریباً "مماس بر لبه پشته است انتخاب شده است، لایه‌های بعدی با عمق ۲۰۰ متر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. مشاهدات و گزارشات از ایستگاههای سینوپتیکی در اطراف دریا برای محاسبه استرس باد و

به جز در نقاط ورودی و خروجی شارش، در مرزها مولفه سرعت صفر هستند، در سطح، شار گرما و نیز استرس مشخص است. در کف، شار گرما صفر است و استرس نیز با یک قانون درگ<sup>۱۷</sup> خطی تعریف می‌شود. شکل (۱) شبکه بندی تفاضل محدود را نشان می‌دهد، واحد پایه یک جعبه است. تابع جریان یک میدان دو بعدی است که در گوشه‌های جعبه تعریف می‌شود. جعبه‌ها در یک شبکه مطابق شکل (۱-الف) قرار دارد که در هر سه بعد می‌تواند واقع شوند. طرح افقی از دریاچه می‌تواند با حذف کردن بعضی جعبه‌ها مشخص شود. توپوگرافی کف با تغییر تعداد جعبه‌ها در یک ستون تعیین می‌شود [۱۳و۲]. لزجت ادی عمودی و پخش گرمایی از فرمول مانک-اندرسن محاسبه می‌شود [۲].

$$A=100 \left| \tau / \rho \right| (1/1+10Ri)^{3/2}$$

$$K=100 \left| \tau / \rho \right| (1/1+10/3Ri)^{1/2}$$

$$Ri = g / \rho \partial \rho / \partial z / \left| \partial V / \partial z \right|^2 \quad (1)$$

$$A_x = 0.25 f \min^2 (\Delta X, \Delta Y)$$

باد غالب در ناحیه خزر تقریباً شمالی است. با توجه به گلبادهای موجود، یک میانگین باد غالب برای هریک از سه حوزه اختیار کرده‌ایم [۱۶-۱۹]. تنش در سطح از فرمول:

$$\tau_w = \rho_a C_d |w| |w| \quad (2)$$

که در آن  $C_d$  ضریب درگ برابر با مقدار  $C_d = (0.8 + 0.065 |W_{10}| \times 10^3) \rho_a$  دانسیته هوا برابر  $1.223 \text{ Kg m}^{-3}$  اختیار شده است تنش در کف از فرمول:

$$\tau_b = 0.002 \rho_o |V_b| |V_b| \quad (3)$$

و تنش در لایه‌های میانی می‌تواند به صورت زیر مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

$$\tau_2 = 2\mu \rho g / P_b (V_1 - V_3) \quad (4)$$

که  $V_1$  و  $V_3$  بردارهای سرعت در لایه‌های اول و سوم هستند. به طور مشابه برای لایه‌های میانه دیگر قابل کاربرد است.

### ۳- فرمول بندی مدل

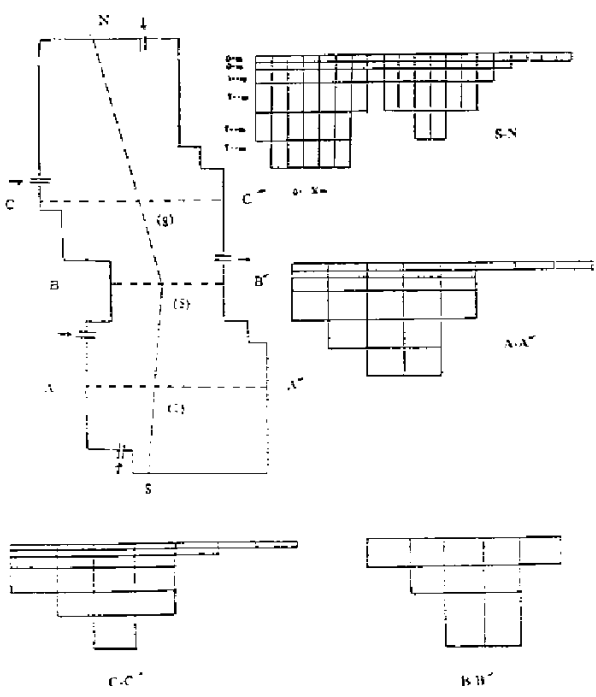
تقریبات فیزیکی مدل به صورت زیر است: -

میدان فشار مورد توجه بوده است، شکل (۱). پارامتر کوریولیس<sup>۱۴</sup> به صورت ثابت برای مرکز هر یک از حوضه‌های سه گانه در نظر گرفته شده است. مطابق با رسم نمودارهای که تغییرات دما بر حسب عمق را نشان می‌دهد وجود یک ترموکلاپین دائم از حدود ۵۰ تا ۳۰۰ متر مشاهده می‌شود، شکل (۲).

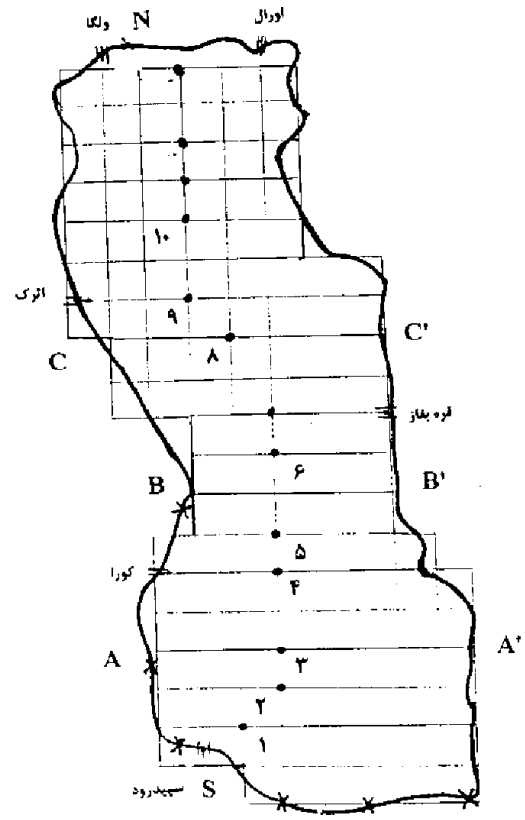
سرعت جریان مشاهده شده به طور متوسط در ماههای مختلف سال تغییر می‌کند و از حدود ۰/۲ تا ۱/۳ متر بر ثانیه در نواحی مختلف در نوسان است [۱۶و۱۹]. با در نظر گرفتن چهار برش، سه برش عرضی در حوزه شمالی-مرکزی-جنوبی و یک برش طولی شمال-جنوب وضعیت توپوگرافی مشخص شده است، شکل (۱). تغییرات پیرامون دریای خزر و همچنین تغییرات توپوگرافی به صورت در نظر گرفتن تعداد شبکه‌ها در سه بعد مد نظر قرار گرفته است. شبکه بندی مدل تقریباً بر اساس مدل سیمنوس، چسبندگی تلاطمی<sup>۱۵</sup> افقی و عمودی و ضریب پخش تلاطمی<sup>۱۶</sup> بر اساس فرمولهای استفاده شده در مدل بنت مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳و۲]. لازم به ذکر است که با توجه به فقدان مطالعات انجام شده در حوزه خزر و نبودن منابع و کارهای انجام شده در مورد گردش سه بعدی آن سرعتها بر اساس نمودار گردش عمومی، گزارشات منتشره و با توجه به مفاهیم فیزیکی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد [۸، ۱۹و۱۶].

### ۲- توصیف مدل

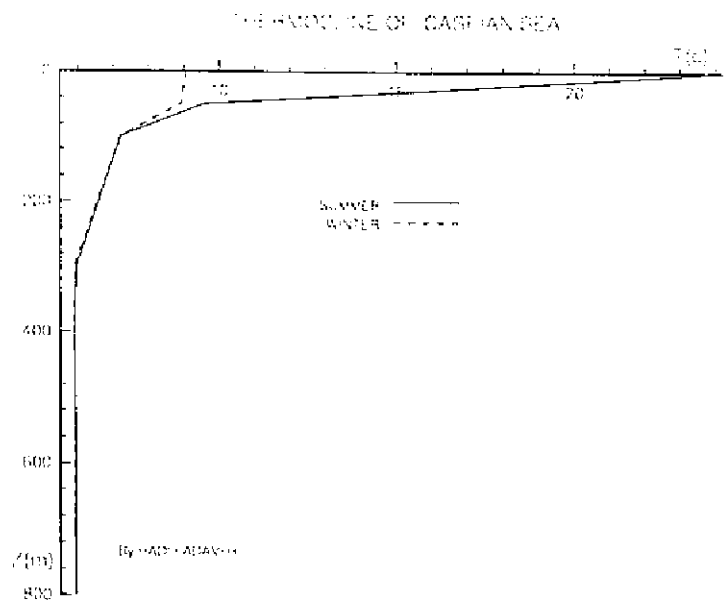
شبکه افقی یکنواخت و به صورت شبکه‌های  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  بررسی شده است که بیشتر تغییرات واقعی را در طرح و عمق در نظر می‌گیرد. به علاوه تغییرات در میدان استرس باد، پایداری دانسیته و ضریب پخش ثابت فرض می‌شود. میدان دمای اولیه از اطلاعات و گزارشات موجود در حوزه‌های شمالی، مرکزی، جنوبی و گشت سال ۱۳۷۴ استفاده شده است.



شکل (۱-ب) - شبکه‌بندی عمودی تفاضل محدود برای مدل سه بعدی در دریای خزر



شکل (۱-الف) - شبکه‌بندی افقی و ایستگاههای نمونه برداری شده (o) و ایستگاههای هواشناسی (x) (گرگان، بابلسر، رامسر، انزلی، آستارا، باکو و استرخان)



شکل ۲ - ترموکلاين در دریای خزر

$$f(\partial\Psi/\partial x \partial h^{-1}/\partial y - \partial\Psi/\partial y \partial h^{-1}/\partial x) - \partial/\partial y [1/\rho_0 \partial p/\partial x + A \partial^2 u/\partial z^2] + \partial/\partial x [-1/\rho_0 \partial p/\partial y + A \partial^2 v/\partial z^2] = 0 \quad (12)$$

با در نظر گرفتن جمله‌های تنش در سطح، میانی و کف معادلات مشخصه حاصل شده و تابع برای  $\Psi$  محاسبه می‌شود.

(۲) مولفه‌های سرعت افقی با استفاده از تعریف زیر قابل محاسبه‌اند.

$$u^{n+1} = -1/h \partial\Psi^{n+1}/\partial y \quad (13)$$

$$v^{n+1} = 1/h \partial\Psi^{n+1}/\partial x \quad (14)$$

(۳) سرعت عمودی جدید با انتگرال گیری از معادله زیر محاسبه می‌شود

$$\partial w^{n+1}/\partial z = -\partial u^{n+1}/\partial x - \partial v^{n+1}/\partial y \quad (15)$$

این انتگرال گیری می‌تواند از بالا یا پایین شروع شود.

(۴) دمای جدید از معادله (۹) با استفاده کردن از روش آدامز-بشفورث برای جمله‌های انتقالی و جمله‌های پخش

محاسبه می‌شود [۶ و ۱۴]. معادله (۱۲) از روش صریح<sup>۳۵</sup> حل شده است. تمام مشتقات مکانی با روش تفاضل مرکزی<sup>۳۶</sup> تقریب شده‌اند. این معادله برای تمام نقاط شبکه (۲۳۵ نقطه)، متناسب در هر لایه، درحوزه اعمال شده است. تعداد نقاط در کل حوزه مورد بررسی و معادلات مشخصه برای آنها نوشته و حل شده است، لایه اول تعداد ۹۹ نقطه، لایه دوم ۵۶ نقطه، لایه سوم ۳۹ نقطه، لایه چهارم ۲۷ نقطه، لایه پنجم ۱۰ نقطه، و لایه آخر ۴ نقطه، در نظر گرفته شده است، شکل (۱). مقادیر محاسبه شده به ترتیب ۲۳۵ داده است که مشخص کننده تابع جریان است. همان

طور که ذکر شد علاوه بر نتیجه مطلوب مدل و کاربرد آن توسط محققان دیگر، ما نیز شرط  $\Delta y \leq \frac{1}{2} \Delta x^2$  را برای

پایداری و همگرایی مدل در نظر گرفته ایم [۶، ۱۰ و ۱۴]. از زبان برنامه نویسی فرترن برای انجام محاسبات استفاده شده است، ضمن اینکه برای حل معادلات هم می‌توان از روش حذفی گوس<sup>۳۷</sup> و یا ماتریس ضرایب با استفاده از نرم افزار Mathematica استفاده کرد [۱۴]. با استفاده از

۱- هیدروستاتیک<sup>۱۸</sup>: شتابهای عمودی صرف نظر می‌شود.

۲- بوزینک<sup>۱۹</sup>: تغییرات دانسیته صرف نظر می‌شود به جز شناوری که مؤثر است.

۳- صفحه f: پارامترهای کوریولیس ثابت فرض می‌شود و مختصات کارتزین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴- دانسیته توسط یک تابع درجه دوم دما تقریب می‌شود.

۵- سطح به صورت لبه سخت رفتار می‌کند.

۶- جمله‌های انتقال<sup>۲۰</sup> مومنتم صرف نظر می‌شود.

۷- اصطکاک توسط یک لزجت تلاطمی عمودی مشخص و معلوم می‌شود.

۸- پخش گرما<sup>۲۱</sup> توسط پخش شدگی تلاطمی مشخص و معلوم می‌شود.

با توجه به مطالب فوق معادلات را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم، [۲۱]

$$\partial u/\partial t = fv - 1/\rho_0 \partial p_s/\partial x - 1/\rho_0 \partial p/\partial x + A \partial^2 u/\partial z^2 \quad (5)$$

$$\partial v/\partial t = -fu - 1/\rho_0 \partial p_s/\partial y - 1/\rho_0 \partial p/\partial y + A \partial^2 v/\partial z^2 \quad (6)$$

$$\partial(L\Psi)/\partial t = -f(\partial\Psi/\partial x \partial h^{-1}/\partial y - \partial\Psi/\partial y \partial h^{-1}/\partial x) - \partial/\partial y [1/\rho_0 \partial p/\partial x + A \partial^2 u/\partial z^2] + \partial/\partial x [-1/\rho_0 \partial p/\partial y + A \partial^2 v/\partial z^2] \quad (7)$$

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0 \quad (8)$$

$$\partial T/\partial t = -\partial(uT)/\partial x - \partial(vT)/\partial y - \partial/\partial z [wT - K \partial T/\partial z] \quad (9)$$

$$b = -6.6 \times 10^{-3} (T - 4)^2 \quad (10)$$

$$p = \int b dz \quad (11)$$

معادلات (۵) و (۶) معادلات مومنتم برای دو مولفه سرعت افقی هستند. معادله (۷) معادله تاوایی<sup>۲۲</sup>، معادله (۸) معادله پیوستگی<sup>۲۳</sup>، معادله (۹) معادله انرژی ترمودینامیک<sup>۲۴</sup>، معادله (۱۰) یک معادله تقریبی برای آب خالص و معادله (۱۱) تعریف P است. همه مشتقات مکانی توسط تفاضل مرکزی تقریب می‌شوند. الگوریتم برای انجام کار دارای چهار مرحله است [۲ و ۶].

(۱) در حالت پایا معادله (۷) تبدیل به معادله زیر می‌شود:

غربی این حوزه می‌باشند. سرعت جریان در قسمت باریک دریای خزر (جنوب حوزه میانی) هنگام ورود به حوزه جنوبی در قسمت غرب دارای سرعت بیشتری نسبت به شرق این نقطه و نسبت به شمال حوزه میانی است. این مطلب با واقعیت همخوانی دارد زیرا با باریک شدن محل عبور جریان سرعت آن باید افزایش یابد و همچنین با گزارشات ارائه شده که بیان کننده پایین بودن سرعت در قسمت شرقی نسبت به قسمت غربی است مطابقت می‌کند [۸ و ۱۶].

در قسمت شمالی دریای خزر در قسمت غرب توده آب دارای حرکتی به طرف جنوب است و در قسمت شرق ضمن اینکه جهت گردش آب به سمت شمال است تفاوت در مقدار سرعت‌های دو طرف کاملاً نمایان است ضمن اینکه به نظر می‌رسد که یک حلقه کوچک جریان در شمال شرقی ناشی از نفوذ آب از جنوب به شمال و ریزش آب از رود اورال در این منطقه ایجاد شود.

بررسی برشهای A-A', B-B', C-C', N-S' در نگاه اول کاهش شدید سرعت با عمق را به طور مشخص نشان می‌دهند، شکل‌های (۴) تا (۷) در برش عرضی A-A' یک بالا آمدگی آب از حدود عمق ۱۰۰ متر در فاصله نسبتاً دوری از قسمت شرقی مشخص است. ضمن اینکه در برش C-C' این مسئله متفاوت است و آب در این قسمت در حال نشستن در حدود عمق ۵۰ متر است که با واقعیت تقریباً همخوانی دارد، در قسمت غربی در برش C-C', A-A' نشن آب در عمق حدود ۵۰ متر مشخص است. با نگاهی کلی در برشهای فوق می‌توان وجود سلولهای گردشی را در دو طرف برشها تصور کرد.

بررسی برش طولی N-S، شکل (۷) نشن آب در قسمت‌های شمالی دریای خزر را نشان می‌دهد ضمن اینکه به نظر می‌رسد که یک گردش در جهت عقربه‌های ساعت از شمال به طرف جنوب حوزه میانی وجود دارد. این گردش حدوداً تا عمق ۱۰۰ متر برقرار است. روی

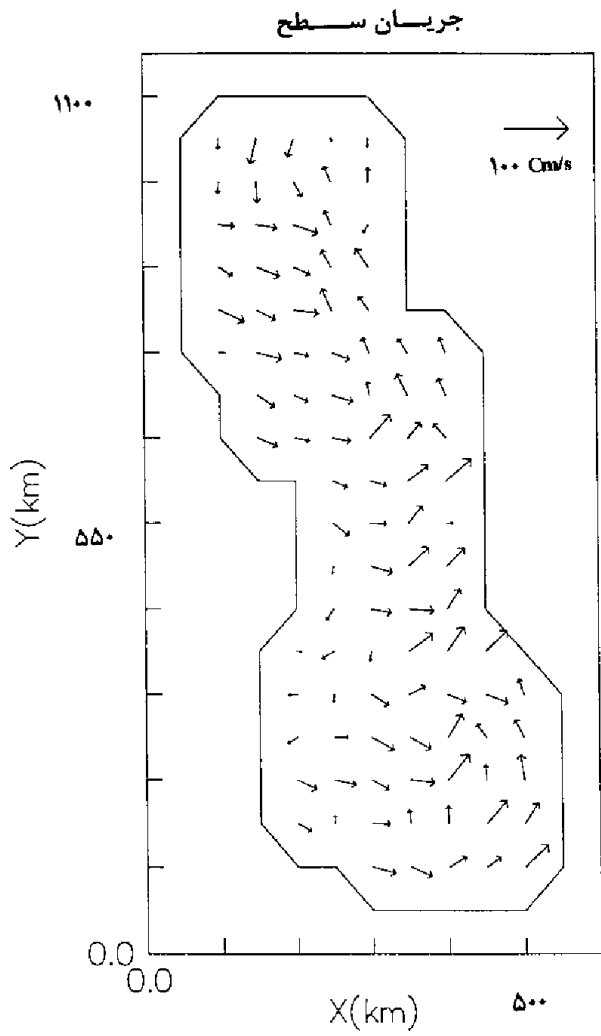
معادلات (۱۳) و (۱۴) مولفه‌های سرعت  $v$  و  $u$  برای نقاط شبکه محاسبه می‌شود. از معادله (۱۵) سرعت عمودی و از معادله (۹) دما در هر نقطه از شبکه محاسبه می‌شود. داده‌های سرعت و دما توسط نرم افزارهای Tecplot, Surfer و Contra رسم شده اند [۲ و ۱۰].

## ۴- نتایج مدل و مقایسه با مشاهدات

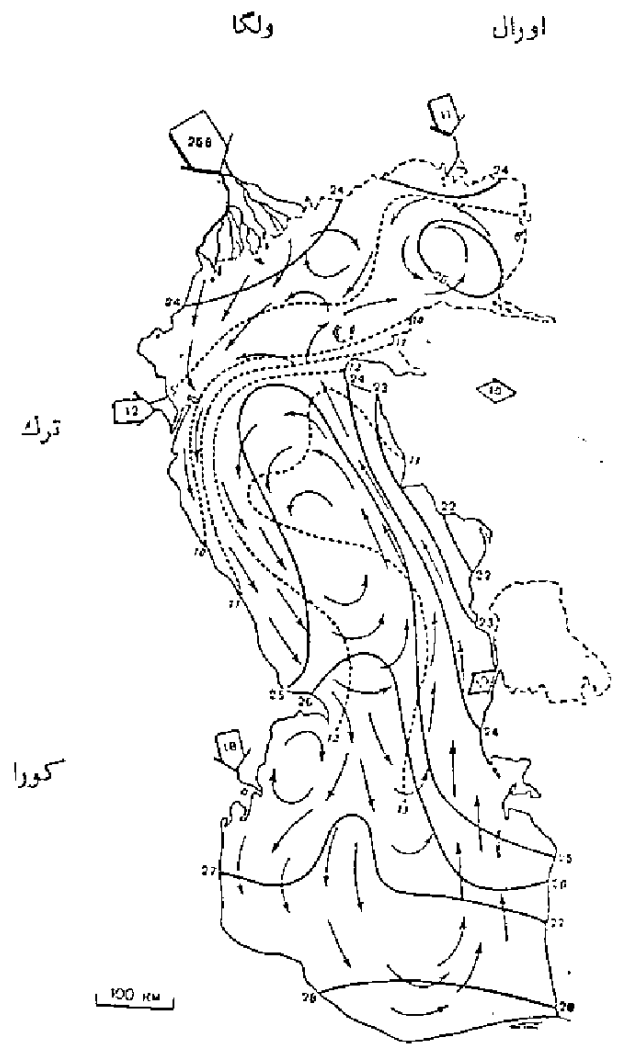
### ۴-۱- جریانات

با مقایسه شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) وجود حلقه‌های جریان در حوزه شمالی و میانی کاملاً مشخص است. نیم حلقه گردشی جریان در حوزه جنوبی نیز به خوبی مشخص است. این حلقه‌های جریان وجود گردش توده آب در خلاف عقربه‌های ساعت را به خوبی نشان می‌دهند. وجود یک حلقه جریان در شمال غربی حوزه جنوبی که جهت گردش توده آب آن در جهت عقربه‌های ساعت است نمایان است. یک جدا شدگی جریان (واگرائی) در شمالی‌ترین نقطه حوزه جنوبی هنگامی که توده آبی که از حوزه مرکزی به جنوبی نفوذ می‌کند بر اثر فرورفتگی در قسمت غربی حوزه جنوبی نمایان است. به عبارت دیگر جریان وارد شده به حوزه جنوبی از کناره‌های شرقی به دو شاخه تقسیم می‌شود که یکی باعث ایجاد گردش اصلی در حوزه جنوبی و دیگری با مقدار به مراتب کمتر سبب یک آنتی سیکلون در آن ناحیه می‌شود. حلقه جریان در حوزه شمالی کامل شده است زیرا برآمدگی شمال شرقی حوزه میانی سبب گردش آب به سمت چپ شده و با آب‌هایی که از کناره‌های غربی حوزه شمالی به جنوب حرکت می‌کنند گردش کامل حوزه شمالی و میانی را تشکیل می‌دهند.

مقیاس سرعتها بر حسب سانتی متر بر ثانیه است. با توجه به شکل (۳-ب) در کل حوزه سرعتها اندکی با هم متفاوت اند. ضمن اینکه مولفه‌های سرعت جریان در شرق حوزه جنوبی بزرگتر از سرعتها در قسمت میانی و

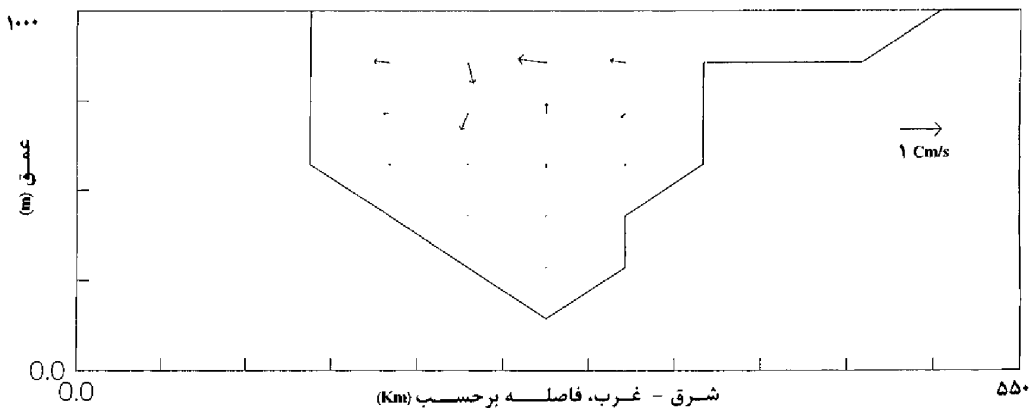


شکل ۳-ب- جریانهای اصلی در سطح دریای خزر حاصل از مدل عددی در حالت پایا

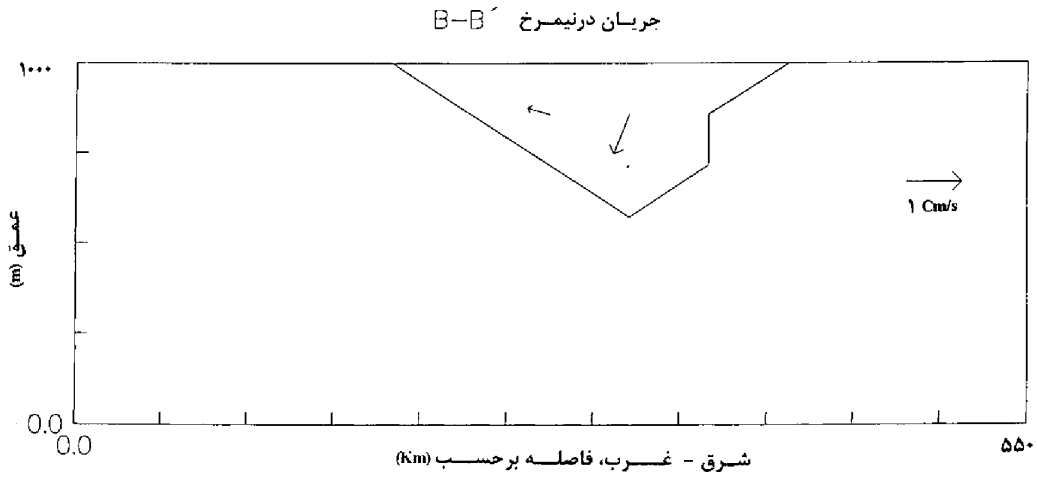


شکل ۳-الف- نمونه‌ای از طرح گردش آب در دریای خزر (بردارهای جریان مسیر حرکت آب را بدون توجه به اندازه سرعت جریان نشان می‌دهند) [۱۶-۱۹].

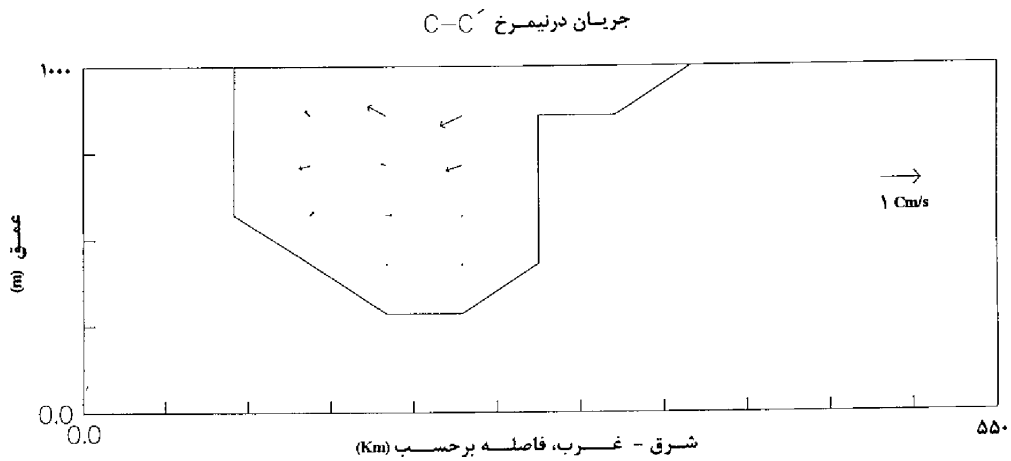
جریان در نیمرخ A-A'



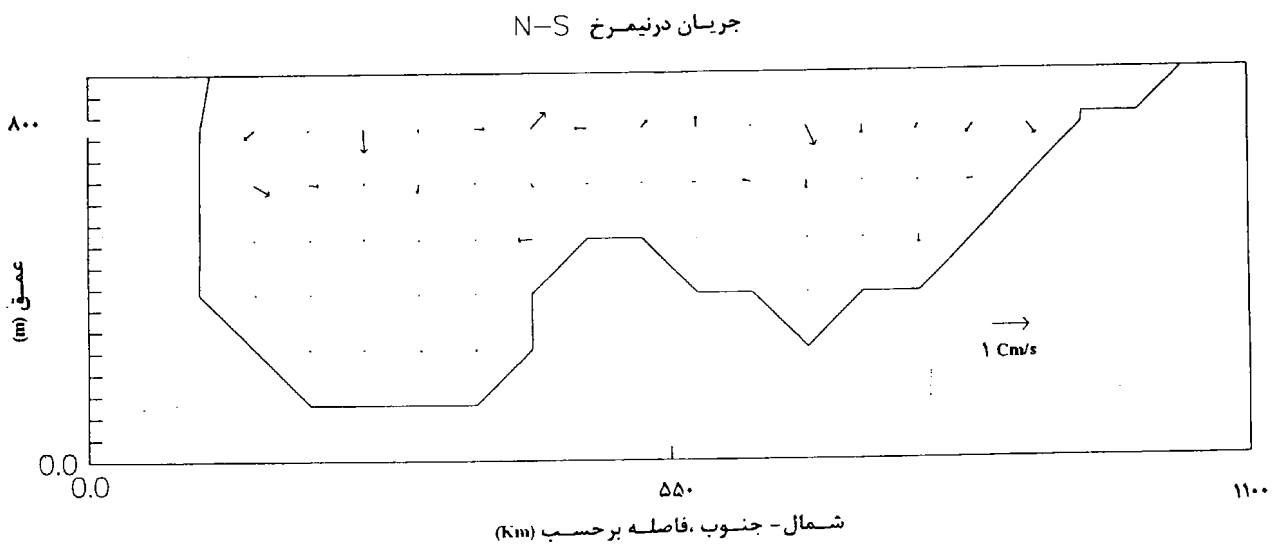
شکل ۴- جریانهای اصلی در دریای خزر حاصل از مدل عددی در حالت پایا در برش عرضی A-A'



شکل ۵- جریانهای اصلی در دریای خزر حاصل از مدل عددی در حالت پایا در برش عرضی B-B'



شکل ۶- جریانهای اصلی در دریای خزر حاصل از مدل عددی در حالت پایا در برش عرضی C-C'



شکل ۷- جریانهای اصلی در دریای خزر حاصل از مدل عددی در حالت پایا در برش طولی N-S



گرانی به طرف جنوب می‌شود

با توجه به همخوانی قابل قبول دما در ایستگاهها و در برش طولی می‌توانیم با اطمینان تغییرات دما را در برشهای عرضی بررسی کنیم، شکل‌های (۱۲) تا (۱۴). تغییرات دما در قسمت شرقی بیشتر از قسمت هم تراز آن در بخش غربی است که با توجه به گرمای قسمت شرقی و نفوذ آب حوزه شمالی به شرق این قسمت طبیعی به نظر می‌رسد. همچنین گرادیانهای ضعیف دما از طرف شرق به مرکز شکل نمایان است که این حالت وجود جریانهای زیر سطح را در جهت عقربه‌های ساعت پیش بینی می‌کند. یک گرادیان دمای نسبتاً بزرگ نیز در محلی که عمق آب شروع به زیاد شدن می‌کند مشخص است که نشان از یک جریان گرانی بر اثر تغییرات دانسیته در این محل است و این مسئله در قسمت غربی این برش با نسبت ضعیفی وجود دارد. بررسی با نمودارها همخوانی خوبی را نشان می‌دهد.

به طور خلاصه می‌توان چنین بیان کرد که مدل قادر است با یک اطمینان قابل قبول ساختار گرمایی در دریای خزر را نشان دهد که این نتایج با نتایج حاصل از گشت دریای همخوانی نسبتاً خوب و با گزارشات موجود در مورد ساختار گرمایی دریای خزر تشابه چشمگیری دارد.

## ۶- نتیجه گیری

این مطالعه اولین کوشش برای پیش بینی ساختار فیزیکی سه بعدی دریای خزر در یک مدل پایاست. کیفیت پیش بینی مدل دریای خزر به طور گسترده به پیش بینی یک مدل اتمسفری کامل وابسته است، به خصوص شرایط باد، در نظر گرفتن اثرات اصطکاکی و بررسی مدل در شرایط وابسته به زمان. مدل قادر است گردش و ساختار دما در دریای خزر را در یک مقیاس بزرگ و متوسط به خوبی نشان دهد. نتایج حاصل از مدل با اطلاعات گشت دریایی همخوانی نسبتاً خوب و با -

پشته جدا کننده بین حوزه میانی و جنوبی صعود آب کاملاً مشخص است که به نظر می‌رسد با توجه به واگرایی که در آن منطقه وجود دارد طبیعی جلوه کند. در قسمت جنوبی دریا (جنوب حوزه جنوبی) یک نشت آب به چشم می‌خورد که می‌تواند بر اثر تغییرات دما و چگال شدن آب در این منطقه با توجه به نزدیکی به ساحل ارزیابی شود. سرعت در تمام چهار برش مطرح شده در زیر عمق حدود ۲۰۰ متر به صورت نامنظم جلوه کرده است.

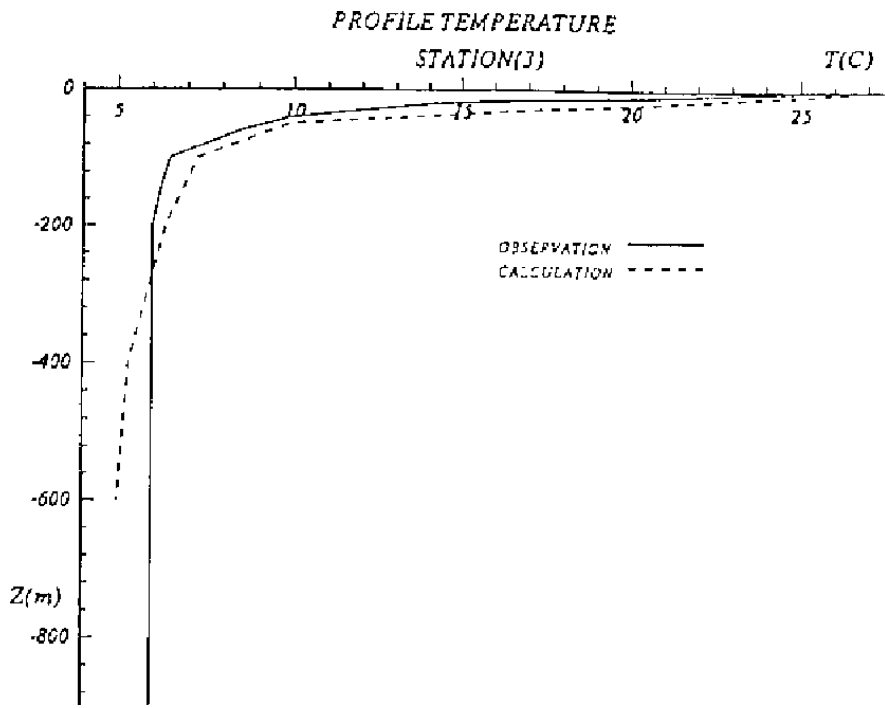
## ۴-۲- ساختار دما

نتایج حاصل از ساختار دما در دو بخش با اطلاعات حاصل از گشت دریایی مقایسه می‌شود. ارزیابی و تجزیه و تحلیل نمودارها توافق و نتیجه بسیار جالبی از مدل را بیان می‌کنند.

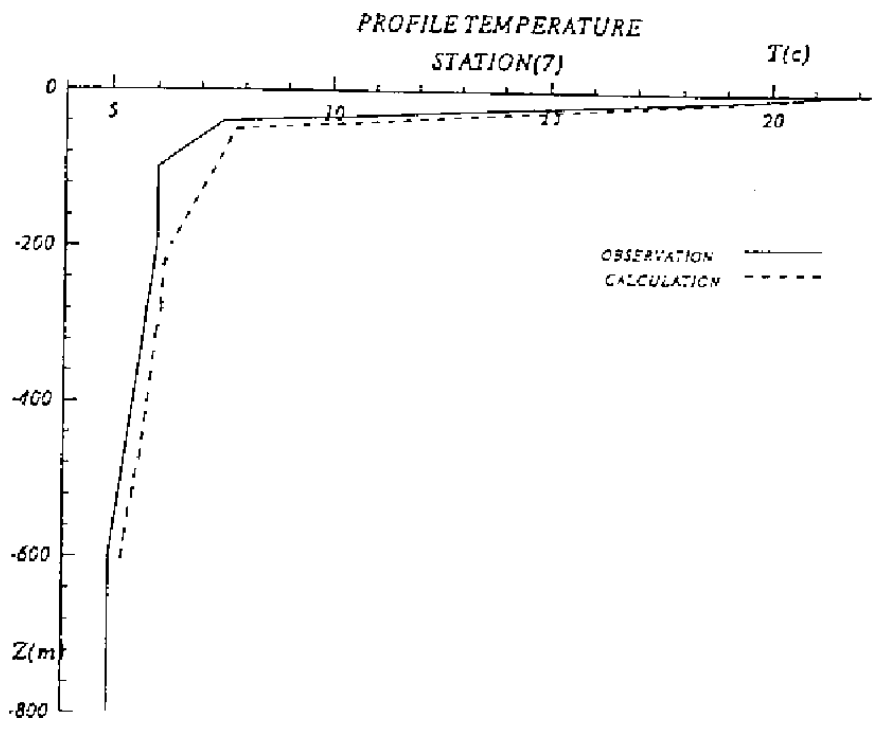
## ۵- مقایسه نتایج حاصل با مشاهدات در ایستگاهها

با یک نگاه کلی به شکل‌های (۸) تا (۱۰) که مقایسه‌ای است بین دمای مشاهده شده و دمای محاسباتی در ایستگاههای شماره (۳)، (۵) و (۷) نشان دهنده یک توافق خوب بین دو نمودار است. با توجه به این مسئله که لایه اول مورد بررسی دارای ضخامت ۵۰ متر در نظر گرفته شده است نتایج حاصل طبیعتاً از بیان و نشان دادن لایه آمیخته عاجز است.

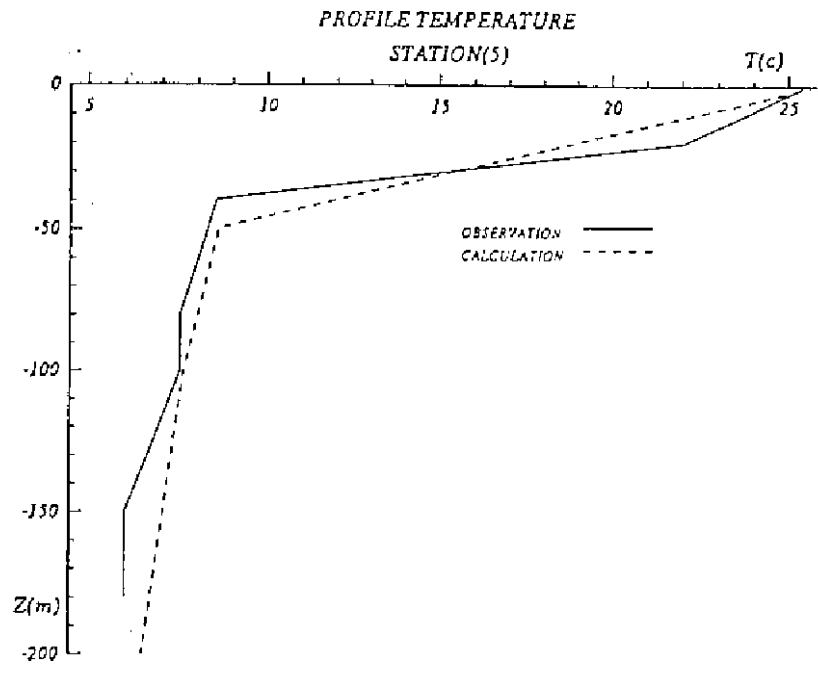
با مقایسه دو شکل (۱۱-الف) و (۱۱-ب) که تغییرات دما را در برش طولی N-S حاصل از اطلاعات گشت دریایی و نتایج حاصل از حل عددی نشان می‌دهد. مشخص می‌شود که این مدل تا حدود زیادی قادر به توصیف و پیش بینی ساختار دما در دریای خزر است. با توجه به شکل‌های فوق یک گرادیان دمای طولی از شمال به جنوب مشاهده می‌شود که با توجه به پایین بودن دما در سطوح هم‌تراز در کل برش باعث ایجاد یک جریان



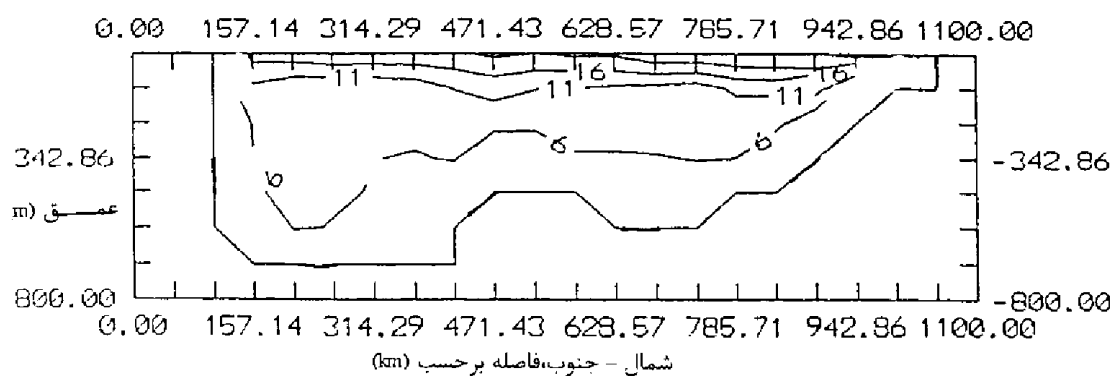
شکل ۸- مقایسهٔ پروفیل دمای حاصل از مشاهده و حل عددی در ایستگاه شماره (۳)



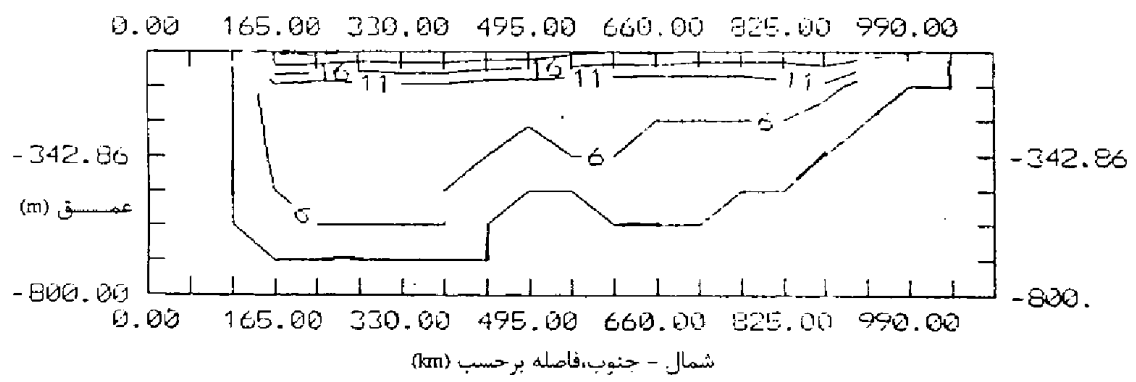
شکل ۹- مقایسهٔ پروفیل دمای حاصل از مشاهده و حل عددی در ایستگاه شماره (۵)



شکل ۱۰- مقایسه پروفیل دمای حاصل از مشاهده و حل عددی در ایستگاه شماره (۷) نیمرخ دما (N-S)

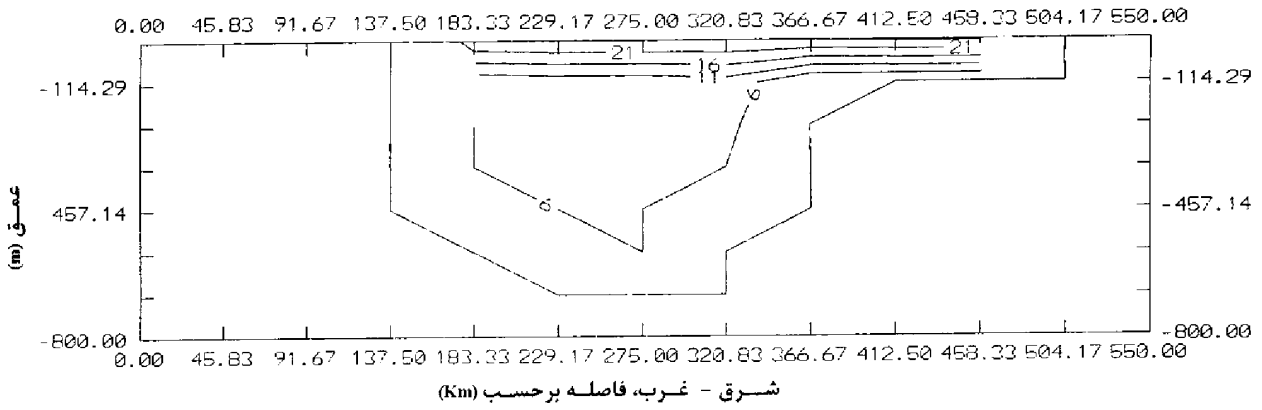


شکل ۱۱-الف- نیمرخ دما در برش N-S حاصل از مشاهدات نیمرخ دما (N-S)



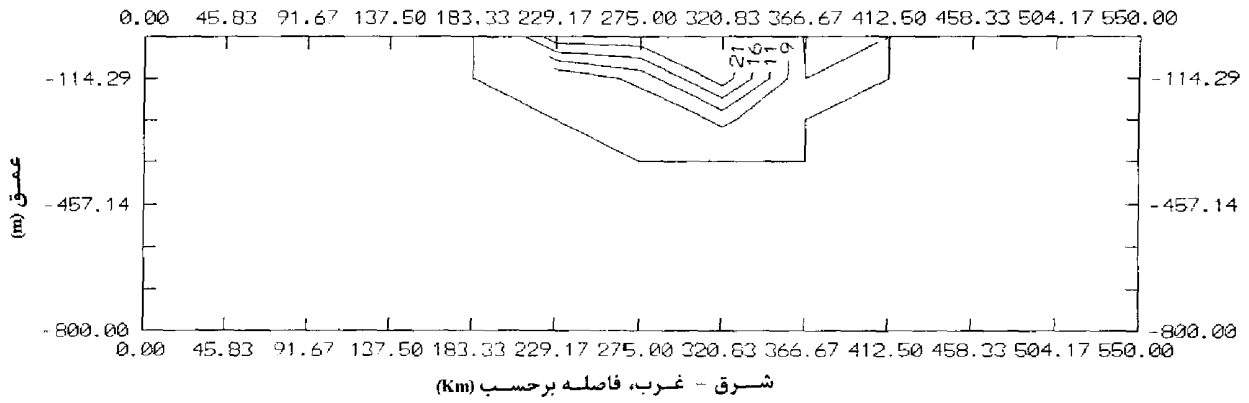
شکل ۱۱-ب- نیمرخ دما در برش N-S حاصل از عددی در حالت پایا

نیمرخ دما (A-A')



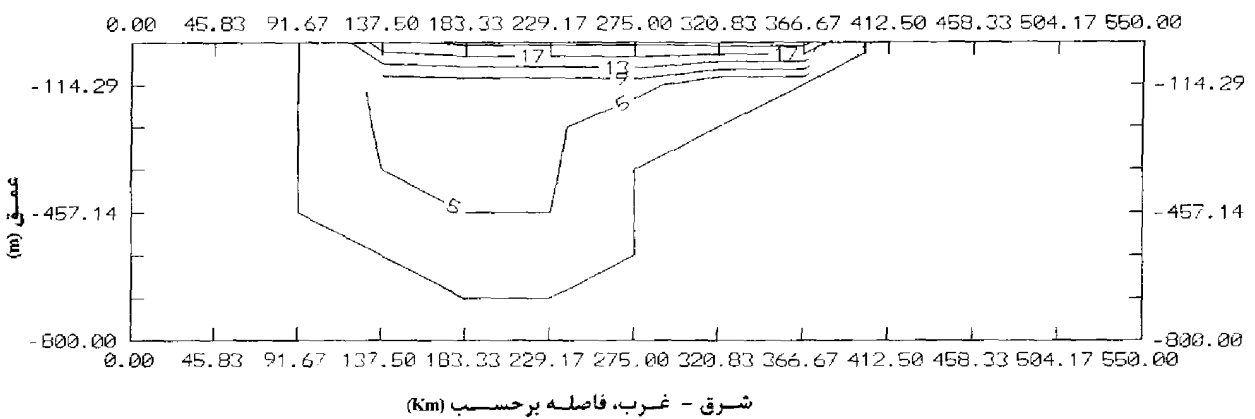
شکل ۱۲- نیمرخ دما در برش A-A' حاصل از حل عددی در حالت پایا

نیمرخ دما (B-B')



شکل ۱۳- نیمرخ دما در برش B-B' حاصل از حل عددی در حالت پایا

نیمرخ دما (C-C')



شکل ۱۴- نیمرخ دما در برش C-C' حاصل از حل عددی در حالت پایا

غرب به شرق (انتهای حلقه حوزة میانی) حرکت می کنند قابل مشاهده است که در توافق با واقعیت است، شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب).

### قدردانی

از دکتر D.Schwab آزمایشگاه تحقیقات محیطی دریاچه‌های بزرگ میشیگان به خاطر ارسال مقالات مهم و راهنمایی‌های ارزنده سپاسگزاریم، دکتر W.M.Schertzer انسیتو تحقیقات ملی آب، انتریو و دکتر K.H.Brink انسیتو اقیانوس شناسی Woods Hole به خاطر ارسال مقالات تشکر می‌کنیم. از دکتر محمدتقی زمانیان به خاطر راهنمایی در نرم افزارهای کامپیوتری تشکر می‌کنیم. از سازمان هواشناسی و سازمان انرژی اتمی ایران به خاطر اطلاعات مفید متشکریم.

گزارشات موجود در مورد ساختار دما هماهنگی دارد. در مورد سرعت جریان نیز حلقه‌های اصلی و جهت حرکت توده آب به خوبی با واقعیت مطابقت دارد. تغییرات سرعت با عمق قابل دقت است و همچنین جهت و حرکت آب در لایه‌های زیر سطح وجود جریانهای دورانی را نشان می‌دهد. مدل به خوبی نمی‌تواند دما را در نزدیک سطح پیشگویی کند، مدل همچنین تغییرات سرعت در کناره‌های شرقی و غربی را به خوبی نمی‌تواند نشان دهد، این موضوع با کار بنت و بریچفیلد روی دریاچه انتریو و میشیگان مشابه است [۲و۴]. همچنین واگرایی در سطح در مناطق مختلف از آن جمله در منطقه ورود آب به حوزة جنوبی شکل (۳-ب) و همگرایی آب در شمال شرق حوزة جنوبی محل تلاقی آبهای که از جنوب به شمال و از

### واژه نامه

- |                    |                             |                               |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1. Hamblin         | 10. semi-analytic           | 19. Boussinesq                |
| 2. Csanady         | 11. time-independent theory | 20. advective terms           |
| 3. Simons          | 12. wind-driven current     | 21. thermal diffusivity       |
| 4. Bennett         | 13. Continental shelf       | 22. vorticity equation        |
| 5. Schwab          | 14. coriolis                | 23. thermodynamic energy      |
| 6. Ontario         | 15. eddy viscosity          | 24. continuity                |
| 7. Erie            | 16. eddy diffusivity        | 25. explicit method           |
| 8. Michigan        | 17. Drag Law                | 26. centered differences      |
| 9. Lee and Liggett | 18. hydrostatic             | 27. Gauss' elimination method |

### مراجع

- Bennett, J. R., "On the Dynamics of Wind-Driven Lakes Currents," *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 4, pp. 400-414, 1974.
- Bennett, J. R., "A Three-Dimensional Model of Lake Ontario's Summer Circulation, I. Comparison with Observations," *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 7, pp. 591-601, 1977.
- Beletsky, D. and Schwab, D. J., "Modeling Thermal Structure and Circulation in Lake Michigan Estuarine and Coastal Modeling," *Proceeding of the Conference American Society of Civil Engineers*, Held October pp. 22-24, 1997.
- Birchfield, G. E. and T. S. Mutry, "A Numerical Model for Wind-Driven Circulation in Lakes Michigan and Huron," *Mon. Weather Rev.* 102, pp. 157-165, 1974.
- Boyce, F. M., M. A. Donelan, P. F. Hamblin, C. R. Murthy and T. J. Simons, "Thermal Structure and Circulation in the Great Lakes," *Atoms-Ocean*, Vol. 27, No. 4, pp. 604-642, 1989.
- Brinen. J. J., *Advanced Physical Oceanography Numerical Modeling*, d. Reidel publishing Company, 1994.

7. Csanady, G. T. and J. T. Scott, "Baroclinic Coastal Jets in Lake Ontario During LFYGL," *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 4, pp. 524-541, 1974.
  8. Department of the Enviroment, "Caspian Enviromental," March 1998.
  9. Frank, A. P. C. and Mccorquodale, J. A. *Chemical Dynamics in Fresh Water Ecosystems*, edLewis Publishers, 1992.
  10. Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., *Numerical Recipes*, Cambridge university Press, 1986.
  11. Schwab, D. J., "Generation of Three-Dimensional Lake Model Forecasts for Lake Erio," *American Meteorological Society*, pp. 659-687, Sep. 1998.
  12. Schwab, D. J., "Numerical Simulation of Low-Frequency Current Fluctuations in Lake Michigan," *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 13 No. 12, pp. 2213-2224, 1983.
  13. Simons, T. J., "Verification of Numerical Models of Lake Onterio: I. Circulation in Spring and Early Summer," *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 4, pp. 507-523, 1974.
  14. Smith, G. D., *Numerical Solution of Partial Differential Equations*, Clarendon Press. Oxford, 1986.
  15. Zamanian, M. T., "Three Dimensional Model for Persian Gulf," Ph.D. Dissertation, University of Philippines, Dilliman, 1994.
۱۶. گزارش سیمینار برگزار شده از طرف آژانس بین المللی انرژی اتمی و سازمان بین المللی یونسکو، "بررسی مسائل دریای خزر"، پاریس ۹-۱۲ مه ۱۹۹۵.
۱۷. بریمانی، ا.، "دریای خزر یا دریای مازندران"، تهران، ۱۳۱۶.
۱۸. کردوانی، پ، "اکوسیستم های آبی ایران (دریای مازندران (دریای خزر))"، قومس، ۱۳۷۴.
۱۹. مفخم پایان، ل، "دریای خزر"، هدایت، ۱۳۷۵.