

## شبیه‌سازی عددی جریان گرانی کف روی سطح شیب‌دار با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم

سرمد قادر<sup>۱\*</sup>، ابوذر قاسمی ورنامخواستی<sup>۲</sup>، محمدرضا بن‌زاده ماهانی<sup>۳</sup> و داریوش منصور<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۴</sup>مربی، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

sghader@ut.ac.ir, abozar.gha@gmail.com, mansoury@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۲۶)

### چکیده

در تحقیق حاضر حل عددی معادلات حاکم بر جریان گرانی روی سطح شیب‌دار با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم به‌منزله روشی با توانایی تفکیک زیاد معرفی می‌شود. گسسته‌سازی مکانی معادلات حاکم با استفاده از دو روش تفاضل متناهی فشرده مرتبه چهارم و تفاضل متناهی مرتبه دوم مرکزی و گسسته‌سازی بخش زمانی معادلات با استفاده از روش لیپ‌فراگ پیشگو-مصحح صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی برای دو رژیم شارش متفاوت با شوری‌های متفاوت به انجام می‌رسد و به‌علاوه جزئیات مربوط به نحوه اعمال شرط مرزی که مناسب و همخوان با روش فشرده مرتبه چهارم هستند، آورده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش مرتبه دوم مرکزی نسبت به روش فشرده مرتبه چهارم در مقادیر شوری و تاوایی روی مرز، نوفه بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین، مشاهده می‌شود که روش فشرده مرتبه چهارم به‌خوبی توانسته است پیچیدگی‌های شارش را در قسمت دم جریان گرانی شبیه‌سازی کند. درنهایت نتایج گویای عملکرد مناسب‌تر روش فشرده مرتبه چهارم برای شبیه‌سازی عددی جریان گرانی کف روی سطح شیب‌دار نسبت به روش مرتبه دوم مرکزی هستند.

واژه‌های کلیدی: جریان گرانی، تفاضل متناهی، طرح‌واره فشرده، دقت عددی، بوسینسک

## Implementation of the fourth-order compact scheme for numerical simulation of bottom gravity current over a slope

Sarmad Ghader<sup>1\*</sup>, Abozar Ghasemi<sup>2</sup>, Mohammad Reza Banazadeh<sup>2</sup>, and Darioush Mansoury<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 21 November 2009, accepted: 16 June 2010)

### Summary

In many numerical simulations of fluid dynamics problems, especially those possessing a wide range of length and time scales (e.g., geophysical flows), low-order numerical schemes are insufficient. Compact finite difference schemes, introduced as far back as the

\*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

1930s, have been found to be simple ways of reaching the objectives of high accuracy and low computational cost. Compared with the traditional explicit finite difference schemes of the same order, the compact schemes are more accurate with the added benefit of using smaller stencil sizes, which can be essential when treating non-periodic boundary conditions. In recent years, the number of studies devoted to the application of compact schemes to spatial differencing of geophysical fluid dynamics problems has been increasing.

This work focuses on the application of a three-point fourth-order compact finite difference scheme for numerical solutions of bottom gravity current over a slope. The governing equations used to perform the numerical simulation are the vorticity-stream function-salinity formulation of the two dimensional viscous incompressible Boussinesq equations.

The details of spatial and temporal discretization of the governing equations are presented. For spatial differencing of the equations, the second-order central and a three-point fourth-order compact finite difference schemes are employed. In addition, the second-order two-stage predictor-corrector leapfrog scheme is used to advance the governing equations in time. Derivation of the consistent boundary condition formulation to generate stable numerical solution without degrading the global accuracy of the computations is also presented. To derive the required numerical boundary conditions for salinity and vorticity fields at lateral, top and bottom boundaries of the computational domain, the fourth-order one-sided (forward and backward) compact relations are used.

Two values for the salinity and a fixed value for bottom slope angle are used to perform the numerical simulations. Qualitative comparison of the results indicates better performance of the fourth-order compact scheme with respect to the second-order method. Furthermore, the computed value of the rate of the head growth of the gravity current generated by the fourth-order compact scheme is in agreement with existing numerical results, which indicates the accuracy of simulations in a quantitative manner. For the test cases used to perform the simulations in the present work, it was observed that the values of salinity and vorticity generated by the second-order method on bottom boundary were too noisy. While, values of salinity and vorticity generated by the fourth-order compact scheme, especially on the bottom boundary of computational domain, do not show this property and are more accurate than those generated by the second-order method. In addition, the numerical results show that the fourth-order compact scheme can successfully simulate the formation of vortices in the tail section of the gravity current, while the second-order scheme fails.

**Key words:** Gravity current, finite difference, compact scheme, numerical accuracy, Boussinesq

می‌شوند. برای مثال تبخیر شدید در دریای مدیترانه آب شوری تولید می‌کند که این آب شور به دلیل سنگینی زیاد از دهانه تنگه جبل الطارق در امتداد شیب قاره به کف اقیانوس اطلس نفوذ می‌کند و دچار آمیختگی و رقیق‌شدگی در محیط اطراف می‌شود (برایدن و کیندر، ۱۹۹۱). همچنین منشاء اصلی توده آب‌های عمیق و میانی در اقیانوس چین سرریزشی از عرض‌های بالایی اقیانوس

## ۱ مقدمه

سرما در دریا‌های قطبی (دیکسون و همکاران، ۱۹۹۰) و تبخیر در دریا‌های حاشیه‌ای (بارینر و پرایس، ۱۹۹۷a) باعث تشکیل توده آب‌های چگال می‌شوند، این توده آب‌ها که به صورت سرریز (Overflow) به داخل جریان‌های بزرگ مقیاس اقیانوسی رها می‌شوند، جریان‌های گرانی کف یا جریان‌های چگالی نامیده

تفکیک زیاد (High-resolution) نامیده می شود (اوزاکمن و چاسیگنت، ۲۰۰۲).

همان گونه که بیان شد، جریان های گرانی تأثیر مهمی بر توده آب های عمیق و میانی دارند. این مطلب مهم ترین دلیل برای کاوش در فهم و درک چگونگی به وجود آمدن این جریان ها و همچنین نحوه گسترش و عملکرد و به طور کلی دینامیک این جریان ها است. یکی از ابزارهایی که برای درک دینامیک جریان گرانی مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده از روش های عددی برای شبیه سازی این جریان است. از جمله کارهای عددی مهمی که برای شبیه سازی جریان گرانی صورت گرفته، می توان به کارهای اوزاکمن (اوزاکمن و چاسیگنت، ۲۰۰۲؛ اوزاکمن و همکاران، ۲۰۰۳؛ اوزاکمن و همکاران، ۲۰۰۴)، بلانچت و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد. تحقیق حاضر در ادامه بررسی های صورت گرفته و در جهت شناخت بهتر دینامیک جریان گرانی به استفاده از روش تفاضل متناهی فشرده مرتبه چهارم در شکل سه نقطه ای آن برای حل عددی معادلات بوسینسک تراکم ناپذیر حاکم بر جریان گرانی روی سطح شیب دار اختصاص دارد.

ایده اصلی روش های فشرده به کارهای نیومروف (۱۹۲۴) و همچنین فاکس و گودوین (۱۹۴۹) باز می گردد. البته شناخت این ایده تحت عنوان روش فشرده و استفاده از آنها برای شبیه سازی دقیق تر معادلات حاکم بر جریان شاره تا سال ۱۹۷۲ به تعویق افتاد تا اینکه کریس و اولیگر در ۱۹۷۲ و هرش در ۱۹۷۵ این روش ها را در حکم ابزاری بسیار قوی برای شبیه سازی دقیق مسائل مکانیک سیالات معرفی کردند. در طی چند سال گذشته بسیاری از محققان گروه های متنوعی از روش های فشرده با خواص تفکیک متفاوت را معرفی کرده اند که از جمله تحقیقات مهم صورت گرفته در این زمینه می توان به کار له (۱۹۹۲) اشاره کرد.

و دریا های حاشیه ای است (پرایس و بارینز، ۱۹۹۴). مشاهدات نشان می دهد که زبانه شوری دریای مدیترانه تا حوزه اقیانوس اطلس شمالی در عمق های میانی گسترش می یابد (لوزیر و همکاران، ۱۹۹۵) و در آنجا ضمن درون آمیزی با آب اقیانوس اطلس، رقیق می شود (پرایس و کوئور، ۱۹۹۳). مقایسه بین چندین مدل عددی اقیانوسی برای جریان اقیانوس اطلس شمالی نشان داده است که قدرت جریان های بزرگ مقیاس ترموهالاین به شدت تحت تاثیر نحوه مدل سازی سرریز در این مدل ها است و سرریز به طور معنی داری با نقش اقیانوس در دینامیک اقلیم مرتبط می شود. بنابراین سرریز نه تنها نقش مهمی در اندرکنش جو و اقیانوس دارد، بلکه نمایش دقیق آمیختگی آن با توده آب پیرامون یکی از فرایندهایی است که مشخصات توده آب های عمیق و میانی در اقیانوس را تعیین می کند (ویلبراند و کوئور، ۲۰۰۱).

از آنجا که توانایی پیش بینی رفتار جریان های بزرگ مقیاس اقیانوسی بر دقت (دینامیکی و عددی) مدل های اقیانوسی تکیه دارد، در نتیجه نمایش دقیق تر دینامیک سرریزش به ویژه آمیختگی آن با شاره پیرامون، در این مدل ها از اهمیت زیادی برخوردار است (اوزاکمن و همکاران، ۲۰۰۳).

مقیاس عمودی کوچک جریان های گرانی کف (در حدود ۲۰۰-۱۰۰ متر) و همچنین نشان دادن آمیختگی میان این جریان ها و سیال پیرامون که از راه ناپایداری کلونین-هلمهولتز (Kelvin-Helmholtz) رخ می دهد، مشکل اصلی شبیه سازی این سرریزش ها در جریان های عمومی اقیانوسی است. برای برطرف کردن این مشکل و نمایش آشکار جریان های گرانی کف، مدل عددی نه تنها باید دارای مقیاس شبکه بندی عمودی کوچک باشد بلکه مقیاس شبکه بندی افقی نیز برای نمایش تشکیل خیز آب ها (Billow) در نزدیکی سطح مشترک چگالی، باید به قدر کافی کوچک باشد. چنین مدلی، مدل عددی با توانایی

$$J(p, q) = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial q}{\partial x}$$

حل عددی با استفاده از فرمول پیشنهادی آرکاوا (۱۹۶۶) بر پایه پایستگی انرژی و آنستروپی محاسبه می‌شود. همچنین جمله  $\frac{\partial S}{\partial x}$ ، جمله تولید تاوایی کزفشار نامیده می‌شود (هارتل و همکاران، ۲۰۰۰؛ پدلاسکی، ۱۹۸۷).

شایان ذکر است که در تحقیق حاضر معادلات و اعداد بی‌بعد استفاده شده اوزاکمن و چاسیگنت (۲۰۰۲) برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۱-۲ گسسته‌سازی زمانی معادلات حاکم

برای گسسته‌سازی زمانی معادلات از روش لپ‌فراگک پیشگو-مصحح که یک روش سه‌ترازه مرتبه دوم است، استفاده می‌شود (گزدگ، ۱۹۷۶؛ دوران، ۱۹۹۹). معادلات

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G(U)$$

حاکم بر مسئله را می‌توان به صورت کلی  $G(U)$  بازنویسی کرد. که در حالت کلی  $U$  می‌تواند یک متغیر نرده‌ای یا برداری در فضای یک تا سه‌بعدی باشد (برای مثال در معادله تاوایی مورد استفاده در تحقیق حاضر تابع  $G$  شامل همه مشتقات مکانی در معادله (۱) است).

شکل گسسته معادله پیش‌گفته به روش لپ‌فراگک پیشگو - مصحح به صورت زیر است:

$$\tilde{U}^{m+1} = U^{m-1} + G^m 2\Delta t \quad (5)$$

$$U^{m+1} = U^m + (G^m + \tilde{G}^{m+1})\Delta t / 2 \quad (6)$$

در این رابطه بالانویس  $m$  نشان‌دهنده تراز زمانی به صورت  $m\Delta t$  است و علامت مد نشان‌دهنده متغیرها در مرحله پیشگو است. در این روش ابتدا در مرحله پیشگو مقداری برای  $U$  در زمان  $t = (m+1)\Delta t$  از رابطه (۵) به دست می‌آید. سپس این مقدار به دست آمده برای  $U$  (منظور  $\tilde{U}^{m+1}$ ) که آن را در اصطلاح، مقدار موقتی کمیت  $U$  می‌نامند، در مرحله دوم که همان مرحله تصحیح است با رابطه (۶) تصحیح می‌شود.

## ۲ معادلات حاکم و گسسته‌سازی آنها

معادلات حاکم معادلات بوسینسک دو بعدی ناپایا، وشکسان و تراکم‌ناپذیر در شکل فرمول‌بندی تاوایی - تابع جریان هستند (اوزاکمن و چاسیگنت، ۲۰۰۲). با استفاده از تعریف متغیرهای بی‌بعد زیر:

$$(x^*, z^*) = \frac{(x, z)}{h}; \psi^* = \frac{\psi}{v_x}; t^* = \frac{v}{h^2} t; S^* = \frac{S}{\Delta S}$$

و پس از بی‌بعدسازی و با حذف ستاره از متغیرهای بی‌بعد، معادلات در شکل بی‌بعد به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + J(\psi, \zeta) = -Gr \frac{\partial S}{\partial x} + \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + r \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + J(\psi, S) = \frac{1}{Pr} \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + r \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial z}, w = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

که در اینجا  $\zeta$  تاوایی (Vorticity)،  $S$  شوری،  $\psi$  تابع جریان،  $u$  و  $w$  مولفه‌های افقی و قائم سرعت هستند ( $\zeta$ ) و  $S$  جزء متغیرهای پیش‌یابی (Prognostic) و  $\psi$  متغیر فرایابی (Diagnostic) است.  $Gr = (gh^3 \beta \Delta S) / v_x^2$ ، عدد گراشف است که در واقع نسبت نیروی شناوری (عامل ناپایدار کننده) به نیروی لختی (عامل پایدار کننده) است.  $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$  شتاب گرانی،  $\beta = 7.5 \times 10^{-4} \text{ psu}^{-1}$  ضریب همرفت شوری برای آب دریا،  $r = \frac{v_z}{v_x} = \frac{k_z}{k_x}$ ، نسبت ضرایب پخش یا وشکسانی قائم به افقی و  $Pr = \frac{v_x}{k_x}$ ، عدد پرائتل است.  $Pr$  نسبت ضریب وشکسانی سینماتیکی به ضریب پخش مولکولی شوری است. عملگر ژاکوبین نیز به صورت

$$F_i - F_{i-1} - dF'_{i-1} - d^2 \left( \frac{1}{6} F_i'' + \frac{1}{3} F_{i-1}'' \right) = 0 \quad (11)$$

$$F_i - F_{i-1} - dF'_i + d^2 \left( \frac{1}{3} F_i'' + \frac{1}{6} F_{i-1}'' \right) = 0 \quad (12)$$

حل هم‌زمان معادلات بالا مشتمل بر روابط روی مرز و روابط داخل حوزه برای مشتقات اول و دوم منجر به حل یک دستگاه معادلات سه‌قطری بلوکی با بلوک‌های دو عضو می‌شود، که با حل این دستگاه معادلات، مقدار مشتقات اول و دوم به دست می‌آیند.

### ۲-۳ گسسته‌سازی شرایط مرزی

در شبیه‌سازی حاضر با دو نوع شرط مرزی بدون نفوذ و بدون لغزش و شرط مرزی لغزش آزاد سروکار داریم. شرط مرزی بدون نفوذ و بدون لغزش بیان می‌کند که سرعت‌های افقی و قائم در روی مرز صفر هستند ( $u = w = 0$ ). اگر  $b$  نشان‌دهنده مرز باشد، در فرمول‌بندی تاوایی-تابع جریان روابط تحلیلی  $\psi|_b = 0$  و  $\frac{\partial \psi}{\partial z}|_b = 0$  بیان‌کننده شرط بدون لغزش روی مرز است. شرط مرزی لغزش آزاد بیان می‌کند که هیچ سرعت عمودی روی مرز وجود ندارد ( $w = 0$ ) و اینکه هیچ شرط برشی روی سرعت مماسی اعمال نمی‌شود ( $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ )، که در فرمول‌بندی تاوایی تابع جریان روابط تحلیلی  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}|_b = \zeta|_b = 0$ ،  $\psi|_b = 0$  مرز است. شرط مرزی برای شوری نیز به صورت  $\frac{\partial S}{\partial \hat{n}} = 0$  در نظر گرفته می‌شود که بردار  $\hat{n}$  بردار عمود بر مرز است (روچ، ۱۹۹۸).

برای گسسته‌سازی شرایط مرزی باید دقت کرد که این گسسته‌سازی باعث ایجاد ناپایداری در حل عددی نشود و به‌علاوه شرایط مرزی نباید باعث کاهش دقت

در واقع طرحواره پیش‌گفته یک طرحواره جایگزین مرتبه دوم برای روش لیپ‌فراگ برای اعمال به معادله فرافت-پخش است. توضیحات مشروح مربوط به پایداری محاسباتی این روش را گزدگ (۱۹۷۶) و دوران (۱۹۹۹) عرضه کرده‌اند.

### ۲-۲ گسسته‌سازی مکانی معادلات حاکم

برای گسسته‌سازی مکانی معادلات در دو راستای  $x$  و  $z$  از روش تفاضل منتهای فشرده مرتبه چهارم استفاده می‌شود (هرش، ۱۹۷۵). روابط روش فشرده مرتبه چهارم برای برآورد مشتقات اول و دوم یک تابع (مانند  $F$ ) بر پایه اینکه در هر نقطه گسسته‌سازی نه تنها مقدار تابع، بلکه مقدار مشتقات تابع نیز مجهول است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{1}{6} F'_{i+1} + \frac{2}{3} F'_i + \frac{1}{6} F'_{i-1} - \frac{1}{2d} (F_{i+1} - F_{i-1}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{12} F''_{i+1} + \frac{5}{6} F''_i + \frac{1}{12} F''_{i-1} - \frac{1}{d^2} (F_{i+1} - 2F_i + F_{i-1}) = 0 \quad (8)$$

در روابط بالا  $d$  بیان‌کننده گام شبکه‌ای در شبکه یکنواخت است. برای گسسته‌سازی مشتقات اول و دوم روی مرز از روابط پیشرو و پسرو فشرده استفاده می‌شود (هرش، ۱۹۷۵). با استفاده از روش هرمیتی و بسط تیلور، روابط پیشرو فشرده به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$F_i - F_{i+1} + dF'_i + d^2 \left( \frac{1}{3} F_i'' + \frac{1}{6} F_{i+1}'' \right) = 0 \quad (9)$$

$$F_i - F_{i+1} + dF'_{i+1} - d^2 \left( \frac{1}{6} F_i'' + \frac{1}{3} F_{i+1}'' \right) = 0 \quad (10)$$

و روابط پسرو فشرده نیز به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\zeta|_b = \frac{3}{\Delta z^2} \psi|_{b+1} - \frac{1}{2} \psi''|_{b+1} \quad (15)$$

اما رابطه دیگر که یک رابطه مرتبه اول است، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\zeta|_b = 2(\psi|_b - \psi|_{b+1}) / \Delta z^2 \quad (16)$$

این رابطه، رابطه‌ای سازگار و همخوان با روش مرتبه دوم مرکزی است، طوری که محققان زیادی از آن استفاده کرده‌اند (روچ ۱۹۹۸؛ تیلور ۱۹۷۰؛ تام ۱۹۳۳؛ فورمان و بنت؛ ۱۹۸۸).

#### ۴-۲ شرایط حل عددی

همان‌گونه که در قسمت مقدمه بیان شد، مشکل اصلی نمایش جریان‌های گرانی کف اقیانوس در مدل‌های گردش عمومی اقیانوسی، مقیاس قائم کوچک این جریان‌ها است، که نوعاً از مرتبه ۱۰۰-۲۰۰ متر است (پرایس و یانگ، ۱۹۹۸). از تجارب آزمایشگاهی (سیمپسون، ۱۹۶۹) و مشاهدات میدانی (بارینر و پرایس، ۱۹۹۷) به خوبی معلوم است که اختلاط مابین جریان چگال و شاره پیرامون عمدتاً از راه ناپایداری کلونین-هلمهولتز رخ می‌دهد. بنابراین برای نمایش صریح جریان گرانی کف نه تنها باید مقیاس قائم شبکه کوچک باشد بلکه مقیاس افقی شبکه نیز برای تسخیر تشکیل خیزآب‌ها در نزدیک سطح مشترک باید به اندازه کافی کوچک باشد. در شبه‌سازی حاضر برطبق دلایلی که در بالا گفته شد و تا آنجا که ممکن است (با توجه به امکانات محاسباتی) مقیاس افقی و عمودی شبکه کوچک (برابر با ۱۰ متر) انتخاب شده‌است. برای انتخاب گام زمانی نیز از عدد کورانت برای سریع‌ترین امواج به صورت  $\frac{\sqrt{g'h} \Delta t}{\Delta x} \leq 1$  استفاده می‌شود. در این رابطه  $g' = g\beta\Delta S$  بیانگر گرانی کاهیده است.

کلی محاسبات شود. بنابراین می‌بایست برای گسسته‌سازی شرایط مرزی از یک روش سازگار با حل عددی استفاده شود. در ادامه به گسسته‌سازی شرایط مرزی سازگار و متناسب با روش فشرده مرتبه چهارم پرداخته می‌شود. برای محاسبه شوری روی مرزها با استفاده از رابطه (۹) برای مرز پایین و با توجه به اینکه مشتق اول شوری روی مرز صفر است، رابطه جدیدی از دقت مرتبه چهارم روی مرز پایین به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$S|_b = S|_{b+2} - \Delta z^2 \left( \frac{1}{3} S''|_{b+1} + \frac{1}{6} S''|_{b+2} \right) \quad (13)$$

در روی مرز بالا و چپ و راست نیز مشابه رابطه بالا با استفاده از روابط پسر و پیشرو مناسب رابطه مرزی مناسب برای شوری استخراج می‌شود.

برای محاسبه تاوایی روی مرز بدون لغزش رابطه تحلیلی موجود نیست یا به عبارتی، مشکل فرمول‌بندی تاوایی-تابع جریان در استفاده از مرز بدون لغزش این است که برای محاسبه مقدار تاوایی روی مرز سخت مانند شوری و تابع جریان رابطه صریحی موجود نیست، بنابراین برای محاسبه تاوایی در مرزها رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (هرش، ۱۹۷۵):

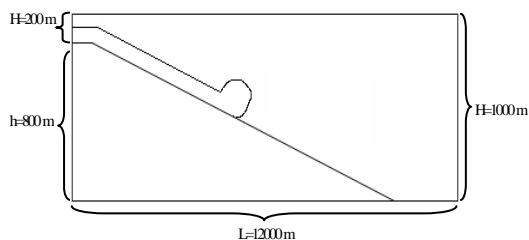
$$\zeta|_b = \frac{12}{\Delta z^2} \psi|_{b+1} - \frac{6}{\Delta z} \psi'|_{b+1} + \psi''_{i,2}|_{b+1} \quad (14)$$

این رابطه، رابطه‌ای از دقت مرتبه سوم است و به دلیل یک مرتبه اختلاف دقت با داخل حوزه، با حل عددی، سازگاری خوبی دارد.

همچنین برای اعمال شرط مرزی بدون لغزش از دو رابطه دیگر یکی از دقت مرتبه دوم و دیگری از دقت مرتبه یک نیز استفاده می‌شود. رابطه مرتبه دوم روی مرز پایین با استفاده از رابطه (۹) و با استفاده از معادله پواسون در روی مرز به صورت زیر نوشته می‌شود:

عمودی به افقی  $r = 10^{-5}$  است، با در نظر گرفتن این مقدار نه تنها فرض می‌شود که ضریب پخش عمودی در اقیانوس کوچک است بلکه اطمینان حاصل می‌شود که آمیختگی عمودی مابین جریان گرانی و شماره پیرامون از راه درون‌آمیزی (Entrainment) و اختلاط القاشده پیچکی (Eddy-Induced Mixing) و نه از راه پخش اتفاق می‌افتد (لدول و همکاران، ۱۹۹۳). عدد پراتسل نیز از روی وشکسانی افقی و پخش افقی برابر با  $Pr = 7$  در نظر گرفته می‌شود.

شرایط مرزی به کار رفته در دستگاه معادلات جریان گرانی روی سطح شیب‌دار به صورت مرز بالا لغزش آزاد و بدون نفوذ ( $\zeta = \psi = \frac{\partial S}{\partial z} = 0$ )، مرز پایین مرز بدون لغزش و بدون نفوذ ( $\zeta = \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$ ) و مرز سمت چپ و راست مرز باز ( $\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$ ) (به ترتیب مرز ورودی و خروجی در نظر گرفته می‌شود) است. به دلیل اینکه در مرز بالا و پایین مقدار تابع جریان صفر انتخاب شده است، در نتیجه از این دو سطح هیچ انتقالی صورت نمی‌گیرد، بنابراین در پاسخ به حرکت جریان گرانی به سمت پایین جریانی در خلاف آن، در سطح تشکیل می‌شود، این مسئله با این حقیقت که یک جریان بازگشتی قوی در سرریزهای اقیانوسی مشاهده می‌شود قابل توجه است (بارینر و پرایس، ۱۹۹۷b).



شکل ۱. نمایی از هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار.

حال با توجه به هندسه مورد استفاده در تحقیق حاضر و عنایت به این نکته که گام زمانی حاصل از شرط CFL شرط لازم برای پایداری را به دست می‌دهد (بنابراین برای تضمین پایداری بهتر است که گام زمانی مورد استفاده نسبت به گام زمانی حاصل از عدد کورانت کمتر گرفته شود) در تحقیق حاضر از گام زمانی یک ثانیه برای حل عددی استفاده می‌شود.

حل عددی مورد نظر در یک ناحیه دوزنقه‌ای شکل که مرز بالای آن افقی و مرز پایین آن شیب‌دار است صورت می‌گیرد. حداکثر عمق ناحیه در سمت راست ناحیه  $H = 1000$  m و حداقل آن از سمت چپ با شروع شیب  $H = 200$  m است. شروع شیب از ارتفاع  $h = 800$  m و از سمت چپ ناحیه است. طول افقی ناحیه نیز  $L = 12000$  m است. نمایی ساده از هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار در شکل ۱ نشان داده شده است.

اکثر نظریه‌های منتشر شده و تحقیقات آزمایشگاهی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار بر کنترل دو پارامتر اختلاف چگالی شماره پیرامون با جریان گرانی و زاویه شیب به منزله پارامترهای اصلی جریان گرانی تاکید کرده‌اند. لذا در تحقیق حاضر با توجه به امکانات محاسباتی موجود، دو بررسی موردی، یکی با  $\Delta S = 1.5$  psu،  $\theta = 2.5^\circ$  و دیگری با  $\Delta S = 0.5$  psu،  $\theta = 2.5^\circ$  انتخاب می‌شود ( $\theta$  بیانگر زاویه شیب است). زاویه انتخاب شده از مرتبه شیب قاره در مقیاس ژئوفیزیکی و مقدار شوری‌ها نیز در گستره چگالی سرریزهای اقیانوسی انتخاب شده‌اند (پرایس و بارینر، ۱۹۹۴). آزمایش‌های عددی در غیاب هرگونه لایه‌بندی شماره پیرامون صورت می‌گیرد. پارامترهای آزمایش‌های عددی در جدول ۱ آمده است. نسبت ضریب پخش



## ۳ نتایج و بحث

## ۱-۳ صحت‌سنجی

همان‌گونه که می‌دانیم کدهای عددی نوشته شده برای شبه‌سازی پدیده‌های گوناگون نیاز به اعتبارسنجی دارند. در تحقیق حاضر از مسئله اقیانوسی استومل (استومل، ۱۹۴۸) به‌منزله یک مسئله خطی و از مسئله شبه‌سازی جریان گرانی روی سطح صاف یا جریان گرانی در قالب شارش گرانی تبادلی (Lock exchange) به‌منزله یک مسئله غیرخطی برای این امر استفاده شده است. نتایج حاصل از شبه‌سازی مسئله خطی استومل نشان می‌دهد که روش فشرده مرتبه چهارم نسبت به روش مرتبه دوم مرکزی دقیق‌تر عمل می‌کند و همچنین از توانایی تفکیک بیشتری نیز برخوردار است.

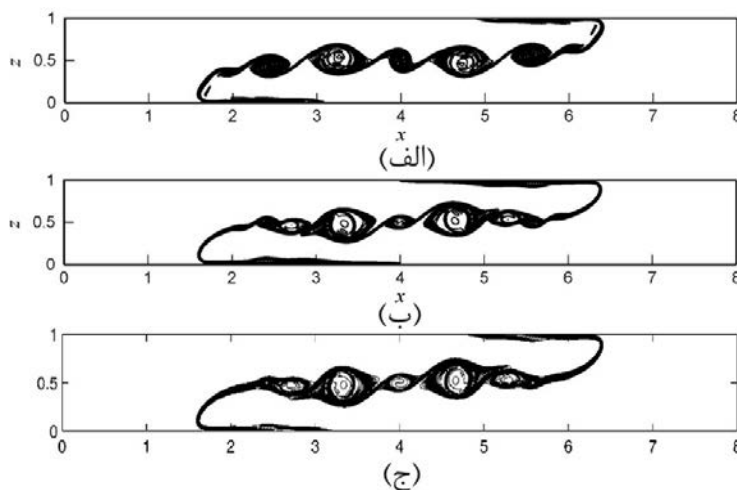
در شکل ۲ نتایج حاصل از شبه‌سازی شارش گرانی تبادلی با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم و مرتبه دوم مرکزی و با به‌کارگیری روابط (۱۳) و (۱۴) برای مرز بدون لغزش و همچنین نتایج به‌دست آمده لیو و همکاران (۲۰۰۳) آورده شده است (برای جزئیات بیشتر به مقاله قادر و همکاران (۱۳۸۸) رجوع شود). در شکل مشاهده

می‌شود که نتایج شبه‌سازی به روش فشرده مرتبه چهارم در تحقیق حاضر همخوانی بسیار خوبی با تحقیق لیو و همکاران دارد. همچنین در شکل مشاهده می‌شود با آنکه روش مرتبه دوم مرکزی، تعداد تاوه‌ها را درست تشخیص داده است ولی در شبه‌سازی جزئیات آن بسیار ضعیف عمل کرده است.

## ۲-۳ نتایج شبه‌سازی با استفاده از روش مرتبه چهارم فشرده

شبکه انتخاب‌شده برای حل عددی شبکه‌ای با تفکیک  $1201 \times 101$  نقطه متناظر با فواصل شبکه‌ای  $10\text{ m}$  در دو راستای محورهای مختصات است. همچنین با توجه به شرط پایداری محاسباتی برای حل عددی از گام زمانی یک ثانیه استفاده می‌شود.

شکل ۳ نتایج حاصل از شبه‌سازی جریان گرانی کف روی سطح شیب‌دار با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم را با  $\Delta S = 1.5\text{ psu}$ ،  $\theta = 2.5^\circ$  نشان می‌دهد. پرندهای نشان داده شده در این شکل در بازه  $[0.05, 1.45]$  قرار



شکل ۲. مقایسه نتایج حاصل از شبه‌سازی عددی میدان شوری جریان گرانی مسطح با به‌کارگیری شرط مرزی بدون لغزش در زمان  $t = 4$  (فاصله میان دو پرنده متوالی برابر با 0.025 است)، (الف) روش مرتبه دوم مرکزی، (ب) روش فشرده مرتبه چهارم و (ج) نتیجه عرضه شده لیو و همکاران (۲۰۰۳).



دارند و فاصله بین دو پربند متوالی 0.05 است. شکل ۳- الف مقدار کوچکی از شار به ارتفاع 190 m را که در تنگه رهاسازی می‌شود نشان می‌دهد، شکل ۳-ب رشد اولیه سامانه را که شبیه جریان گرانی تبادل (Lock exchange) است، نشان می‌دهد که در آن شاره سبک‌تر در بالا باقی می‌ماند و شاره سنگین که در کف است به سمت پایین نفوذ می‌کند و در امتداد سطح شیب‌دار گسترش می‌یابد (کولگان، ۱۹۵۸؛ سیمپسون، ۱۹۹۷). شکل ۳-ج نشان می‌دهد که جریان گرانی به یک آهنگ ثابت ورودی در تنگه می‌رسد و مشخصه نوک (Head) در قسمت لبه حمله (Leading edge) جریان شکل می‌گیرد. در شکل ۳-د مشاهده می‌شود که جریان گرانی که در ابتدا پایدار است، با گذشت زمان در حدود فاصله ۷ کیلومتری پایین شیب قسمت نوک و عقب جریان شروع به ناپایدار شدن می‌کند که در این قسمت، نوک ناحیه شکست امواج و اختلاط شدید است. در شکل ۳-ه مشاهده می‌شود که قسمت عقبه جریان نیز که دم (Tail) نامیده می‌شود شکل ناپایداری به خود گرفته است و ناپایداری بالای دم باعث تشکیل یک روی هم جمع‌شدگی (Roll up) به صورت تاوهای کلوخه‌ای (Lumped vortices) می‌شود. این رفتار به‌طور واضح به ناپایداری کلین-هلمهولتز اشاره دارد که باعث به‌دام افتادن شاره سبک در شاره سنگین می‌شود (کورکوس و شرمان، ۱۹۸۴). ضخامت دم در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر است که توافق نسبتاً خوبی با ضخامت جریان گرانی اقیانوس در فلات قاره‌ها دارد (پرایس و یانگ، ۱۹۹۸). همین‌طور که جریان گرانی به سمت پایین شیب نزول می‌کند، نوک رشد می‌کند و از راه درون‌آمیزی با شاره کم‌چگال پیرامون، رقیق می‌شود. در شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با به‌کارگیری پارامترهای  $\Delta S = 0.5$  psu,  $\theta = 2.5^\circ$  نشان داده شده است. پربندهای نشان داده شده در این شکل در بازه [0.05, 0.45] قرار دارند و فاصله

بین دو پربند متوالی 0.05 است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، سرعت نزول جریان به پایین سطح شیب‌دار با مورد قبلی که مقدار اختلاف شوری در آن بیشتر بود تفاوت معنی‌داری دارد که این خود گویای آن است که اختلاف چگالی جریان گرانی با محیط پیرامون اثر معنی‌داری بر سرعت نزول این جریان دارد، به‌طوری که بعد از گذشت مدت زمان ۵ ساعت از رهاسازی جریان گرانی در بالای تنگه، جریان به حدود ۷ کیلومتری پایین سطح شیب‌دار رسیده است. همچنین ارتفاع نوک نیز کمتر است در صورتی که جریان با اختلاف شوری  $\Delta S = 1.5$  psu بعد از مدت زمان ۴/۲۵ ساعت به حدود ۱۲ کیلومتری پایین سطح شیب‌دار می‌رسد و ارتفاع نوک نیز بیشتر می‌شود. قسمت دم نیز در مورد دوم حتی بعد از گذشت مدت زمان ۵ ساعت به حالت ناپایدار شبیه مورد اول نمی‌رسد و شکل تقریباً پایداری دارد یا به عبارت بهتر درون‌آمیزی شاره سنگین با کمتر شدن مقدار اختلاف شوری با محیط پیرامون کاهش می‌یابد.

در مرحله بعدی برای اعمال شرط مرزی بدون لغزش از روابط (۱۵) و (۱۶) که به ترتیب روابطی از دقت مرتبه دو و یک هستند استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که استفاده از رابطه مرتبه سوم برای تاوایی، خطای کمتری روی مرز پایین تولید می‌کند. یا به عبارتی استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) خطای (نوفه) بیشتری نسبت به رابطه (۱۴) روی مرز تولید می‌کنند.

نتایج آزمایشگاهی حاصل از کارهای الیسون و ترنر (۱۹۵۹)، بریتو و لیدن (۱۹۸۰) و موناکان و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند که آهنگ تغییرات ضخامت نوک  $H$  با فاصله از مبدا مختصات  $X$  برابر است با:

$$\frac{dH}{dX} \approx 4 \times 10^{-3} \theta$$

می‌دهد. پربندهای نشان داده شده در این شکل در بازه [0.05, 1.45] قرار دارند و فاصله بین دو پربند متوالی 0.05 است. در این شکل نیز مانند مورد قبلی، با نزول جریان به سمت پایین، ارتفاع نوک افزایش می‌یابد.

در شکل ۵-ج مشاهده می‌شود که بعد از گذشت 1.5 ساعت از نزول جریان به سمت پایین، مشخصه نوک شکل می‌گیرد. با گذشت زمان درون آمیزی شاره سنگین با شاره پیرامون باعث می‌شود که حجم نوک افزایش یابد که این موضوع در شکل‌های ۵-د و ۵-ه به خوبی دیده می‌شود.

### ۳-۴ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش مرتبه

#### دوم مرکزی و فشرده مرتبه چهارم

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش مرتبه دوم مرکزی و مرتبه چهارم فشرده مشاهده شد که نتایج حاصل از این دو روش با هم تفاوت ملموسی دارند. قسمت دم در شبیه‌سازی با روش مرتبه دوم تقریباً پایدار باقی می‌ماند و فقط قسمت‌هایی از دم که در پایین سطح شیب‌دار است به صورت ناپایدار در می‌آید. در استفاده از روش فشرده مشاهده شد که بعد از تقریباً فاصله ۷ کیلومتری پایین سطح شیب‌دار، قسمت دم شروع به ناپایدار شدن، می‌کند. پدیده کلوخه‌شدگی به راحتی در قسمت دم دیده می‌شود، به طوری که از این زمان به بعد ناپایداری رشد می‌کند و به تمام قسمت دم انتقال می‌یابد. نکته جالب دیگر اینکه همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در شبیه‌سازی به روش مرتبه دوم، مقدار اولیه پربندهای شوری که در زمان اولیه میان [0.05, 1.45] است بعد از گذشت مدت‌زمان 4.25 ساعت و نزول جریان به پایین سطح شیب‌دار به مقدار [10.0, -1.5] افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده تولید خطای بسیار زیادی است. با بررسی پربندهای خطا، مشخص شد که این مقادیر روی مرز پایین تولید می‌شود. باید توجه کرد که رابطه مرزی مورد

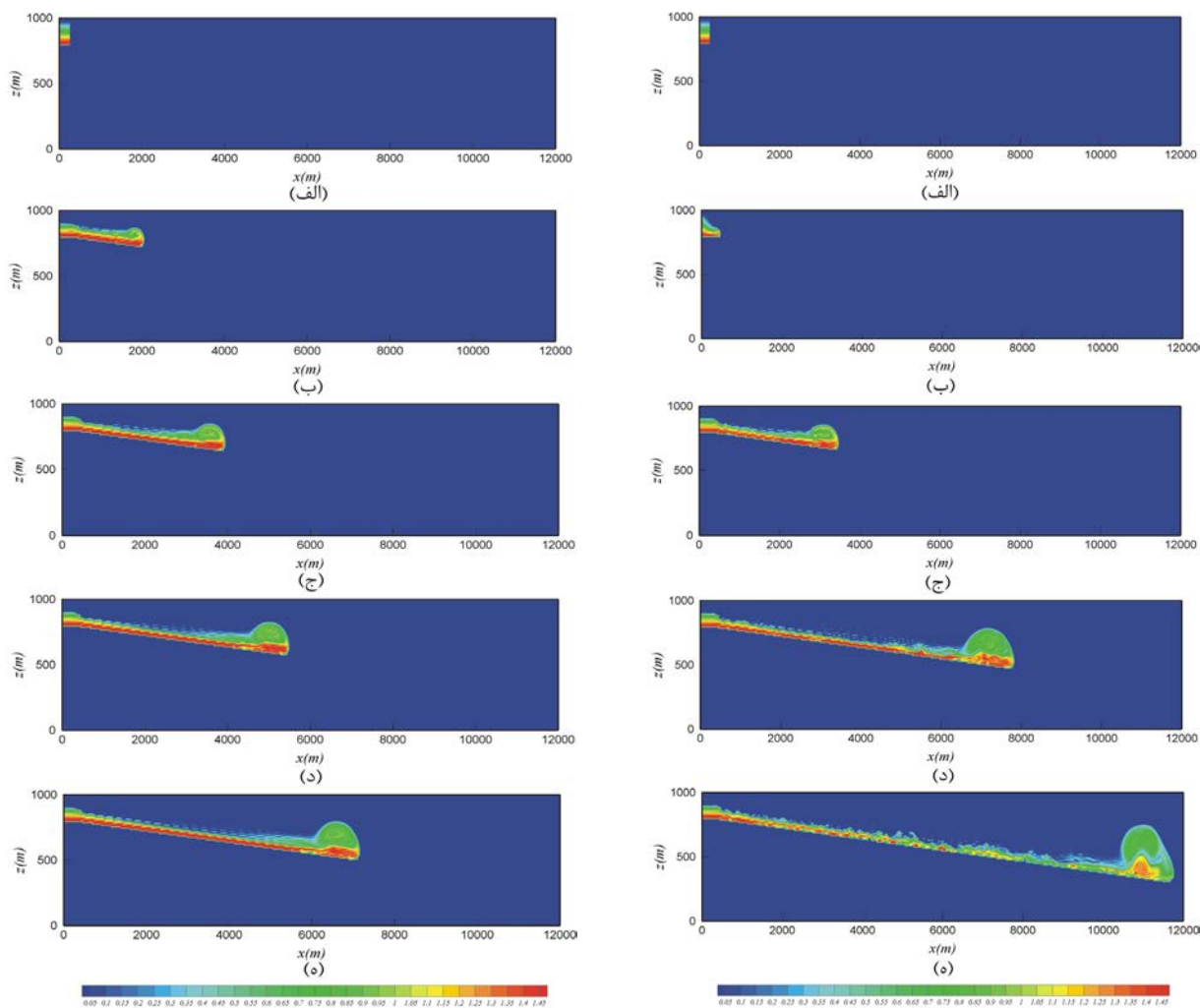
در اینجا  $\theta$  برحسب درجه است. در آزمایش عددی حاضر برای کمی کردن نرخ تغییرات  $H$  با فاصله  $X$  در دو آزمایش (با شوری متفاوت ولی با زاویه شیب برابر) صورت گرفته است؛ در هر 0.5 km پیشروی جریان به سمت پایین شیب، ارتفاع نوک اندازه‌گیری شد (اوزاکمن و چاسیگنت، ۲۰۰۲)، که مقدار به دست آمده برابر شد با:

$$\frac{dH}{dX} = 0.034$$

از این رابطه و رابطه آزمایشگاهی به دست آمده به خوبی استنباط می‌شود که شبیه‌سازی حاضر به درستی توانسته است آهنگ ثابت رشد نوک را بدون وابستگی به مقدار اختلاف شوری  $\Delta S$  نشان دهد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی، مشاهده شد که  $dH/dX$  در نتایج آزمایشگاهی تقریباً سه برابر مقدار به دست آمده از نتایج عددی است. در بررسی عددی اوزاکمن و چاسیگنت (۲۰۰۲) این مقدار برابر با 0.038 به دست آمد که توافق خوبی با کار حاضر دارد. اوزاکمن بیان کرد که اختلاف حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی، ناشی از حل دوبعدی است، که در آن گسترش و عریض شدن جریان از کناره‌ها در نزول جریان به پایین سطح شیب‌دار در نظر گرفته نمی‌شود.

### ۳-۳ شبیه‌سازی با استفاده از روش مرتبه دوم مرکزی

برای ایجاد امکان مقایسه، از روش مرتبه دوم مرکزی نیز برای شبیه‌سازی استفاده شد. مانند قسمت قبل شبکه انتخاب شده، شبکه‌ای با تفکیک  $1201 \times 101$  متناظر با فواصل شبکه‌ای 10 m در دو راستای مختصات است و مقدار شوری و زاویه شیب برای شبیه‌سازی  $\Delta S = 1.5$  psu,  $\theta = 2.5^\circ$  انتخاب می‌شود. بقیه جزئیات نیز مانند مورد قبل است. شکل ۵ نتایج حاصل از حل عددی جریان گرانی به روش مرتبه دوم مرکزی را نشان

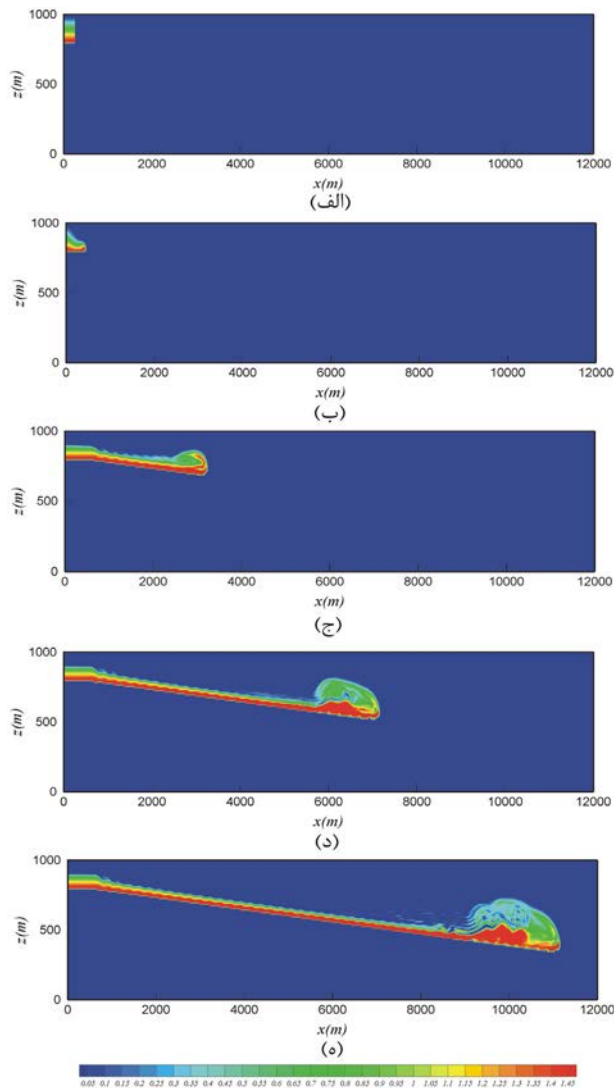


شکل ۳. تحول زمانی میدان شوری روی سطح شیب‌دار به روش فشرده مرتبه چهارم با اختلاف شوری  $\Delta S = 1.5$  psu برحسب ساعت، (الف)  $t = 0$  h (ب)،  $t = 0.125$  h (ج)،  $t = 1.5$  h (د)،  $t = 3$  h (ه) و  $t = 4.25$  h.

شکل ۴. تحول زمانی میدان شوری روی سطح شیب‌دار به روش فشرده مرتبه چهارم با اختلاف شوری  $\Delta S = 0.5$  psu برحسب ساعت، (الف)  $t = 0$  h (ب)،  $t = 1.5$  h (ج)،  $t = 3$  h (د)،  $t = 4$  h (ه) و  $t = 5$  h.

جدول ۱. پارامترهای آزمایش‌های عددی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار.

12000×1000 m	ابعاد ناحیه
$\theta = 2.5^\circ$	زاویه شیب بستر
$\Delta S = 1.5, 0.5$ psu	اختلاف شوری
$v_x = 7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, v_z = 7 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	ضرایب وشکسانی $(x, z)$
$k_x = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, k_z = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	ضرایب پخش $(x, z)$
$\Delta x = \Delta z = 10$ m	قدرت تفکیک
1534 ( $\Delta S = 1.5$ psu), 514 ( $\Delta S = 0.5$ psu)	عدد گراشف
$Pr = 7$	عدد پراتل
$r = 10^{-5}$	نسبت پخش



شکل ۵. تحول زمانی میدان شوری روی سطح شیب‌دار به روش مرتبه دوم مرکزی با اختلاف شوری  $\Delta S = 1.5 \text{ psu}$  برحسب ساعت، (الف)  $t = 0 \text{ h}$ ، (ب)  $t = 0.125 \text{ h}$ ، (ج)  $t = 1.5 \text{ h}$ ، (د)  $t = 3 \text{ h}$ ، (ه)  $t = 4.25 \text{ h}$ .

جدول ۲. مقایسه خطای تولید شده در مقدار پریندهای شوری برای روش‌های فشرده مرتبه چهارم و روش مرتبه دوم مرکزی.

نوع روش	کمینه پریندهای شوری	بیشینه پریندهای شوری
مرتبه چهارم فشرده	-0.8	2.49
مرتبه دوم مرکزی	-1.5	10.0

استفاده در مرز پایین برای شوری و تاوایی، مشابه مورد شارش گرانی تبادلی است که از جمله بهترین روابط در شبیه‌سازی با روش دوم مرکزی محسوب می‌شود (روچ (۱۹۹۸)، تیلور (۱۹۷۰)، تام (۱۹۳۳)، فورمان و بنت (۱۹۸۸)). اما در شبیه‌سازی با روش فشرده مرتبه چهارم، مقدار بیشینه و کمینه پریندهای شوری که تا زمان  $t = 4.25 \text{ h}$  تولید می‌شود به ترتیب برابر با  $[-0.8, 2.49]$ ، و مربوط به زمان  $t = 3.5 \text{ h}$  است. این در مقایسه با روش مرتبه دوم، نتیجه بسیار خوبی محسوب می‌شود.

## ۵ نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی کاربرد روش فشرده مرتبه چهارم در نحوه افزایش دقت مسئله موردی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار در دو بعد پرداخته شده است. نتایج به دست آمده و مقایسه کیفی آنها برای میدان شارش جریان گرانی با پیچیدگی‌های فراوان نشان می‌دهد که روش فشرده مرتبه چهارم از توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی دقیق میدان شارش مورد بررسی برخوردار است. مقایسه روش فشرده مرتبه چهارم با روش تفاضل متناهی مرکزی مرتبه دوم در شبیه‌سازی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار نشان می‌دهد که روش مرتبه دوم مرکزی عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی میدان شارش پیچیده مورد بررسی در تحقیق حاضر دارد و روش مرتبه دوم مرکزی نسبت به روش فشرده مرتبه چهارم نوفه بیشتری در مقادیر شوری و تاوایی روی مرز ایجاد می‌کند. همچنین مشاهده شد که روش فشرده مرتبه چهارم به خوبی توانسته است پیچیدگی‌های جریان را در قسمت دم شبیه‌سازی کند. این امر خود نشان از قدرت تفکیک زیاد روش فشرده مرتبه چهارم دارد.

- Ellison, T. H. and Turner, J. S., 1959, Turbulent entrainment in stratified flows: *Journal of Fluid Mechanics*, **6**, 423-448.
- Foreman, M. G. G., and Bennett, A. F., 1988, On the no-slip boundary conditions for the incompressible Navier-Stokes equations: *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **12**, 47-70.
- Fox, L., and Goodwin E. T., 1949, Some new method for the numerical integration of ordinary differential equations: *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **45**, 373-388.
- Gazdag, J., 1976, Time-differencing schemes and transform methods: *Journal of Computational Physics*, **20**, 196-207.
- Hartel, C., Meiburg, E., and Necker, F., 2000, Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head: Part 1: flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries: *Journal of Fluid Mechanics*, **418**, 189-212.
- Hirsh, R. S., 1975, Higher order accurate difference solutions of fluid mechanics problems by a compact differencing technique: *Journal of Computational Physics*, **19**, 90-109.
- Keulegan, G. H., 1958, The motion of saline fronts in still water: U.S. National Bureau of Standards Report.
- Kreiss, H. O., and Olinger, J., 1972, Comparison of accurate methods for the integration of hyperbolic equations: *Tellus*, **24**, 199-215.
- Ledwell, J. R., Watson, A. J., and Law, C. S., 1993, Evidence for slow mixing across the pycnocline from an open-ocean tracer-release experiment: *Nature*, **364**, 701-703.
- Lele, S., 1992, Compact finite difference schemes spectral-like resolution: *Journal of Computational Physics*, **103**, 16-42.
- Liu, J. G., Wang, C., and Johnston, H., 2003, A Fourth order Scheme for Incompressible Boussinesq Equations: *Journal of Scientific Computing*, **18**, (2), 253-285.
- Lozier, M. S., Owens, W. B., and Curry, R. G., 1995, The climatology of the North Atlantic: *Progress in Oceanography*, **36**, 1-44.
- Monaghan, J. J., Cas, R. A. F., Kos, A. M., and Hallworth, M., 1999, Gravity currents descending a ramp in a stratified tank: *Journal of Fluid Mechanics*, **379**, 39-70.
- Numerov, B. v., 1924, A method of extrapolation of perturbations: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **84**, 592-601.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه‌های تهران و تربیت مدرس به لحاظ حمایت از این کار تحقیقاتی تشکر می‌کنند.

## منابع

- قادر، س.، قاسمی، ا.، بنزاده، م.، منصوری، د.، ۱۳۸۸، حل عددی معادلات بوسینسک تراکم‌ناپذیر با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم: مطالعه موردی شارش lock-exchange: دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها.
- Arakawa, A., 1966, Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two dimensional incompressible flow: *Journal of Computational Physics*, **1**, 119-143.
- Baringer, M. O., and Price, J. F., 1997a, Mixing and spreading of the Mediterranean outflow: *Journal of Physical Oceanography*, **27**, 1654-1677.
- Baringer, M. O., and Price, J. F., 1997b, Momentum and energy balance of the Mediterranean outflow: *Journal of Physical Oceanography*, **27**, 1678-1692.
- Blanchette, F., Piche, V., Meiburg, E., and Strauss, M., 2005, Evaluation of a simplified approach simulating gravity currents over slopes of varying angles: *Computers & Fluids*, **35**, 492-500.
- Britter, R. E., and Linden, P. F., 1980, The motion of the front of a gravity current traveling down an incline: *Journal of Fluid Mechanics*, **99**, 531-543.
- Bryden, H. L. and Kinder, T. H., 1991, Steady two-layer exchange through the Strait of Gibraltar: *Deep-Sea Research*, **38**, 445-463.
- Corcros, G. M., and Sherman, F. S., 1984, The mixing layer: Deterministic models of a turbulent flow. Part 1: Introduction and the two-dimensional flow: *Journal of Fluid Mechanics*, **139**, 29-65.
- Dickson, R. R., Gmitrowics E. M., and Watson A. J., 1990, Deep water renewal in the northern North Atlantic: *Nature*, **344**, 848-850.
- Durran, D. R., 1999, Numerical methods for wave equations in geophysical fluid dynamics: Springer, New York.

- Mediterranean outflow mixing and dynamics: *Science*, **259**, 1277-1282.
- Roache, P. J., 1998, *Computational fluid dynamics*: Hermosa Publishers.
- Simpson, J. E., 1969, A comparison between laboratory and atmospheric density currents: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **95**, 758-765.
- Simpson, J. E., 1997, *Gravity Currents: in the Environment and the Laboratory*: 2nd Ed. Cambridge University Press.
- Stommel, H., 1948, The westward intensification of wind driven ocean currents: *Transactions American Geophysical Union*, **29**, 202-1948.
- Taylor, P. J., 1970, The linear stability of no-slip boundary conditions in the numerical solution of nonsteady fluid flows: *Journal of Computational Physics*, **6**, 268-287.
- Thom, A., 1933, The flow past a circular cylinders at low speeds: *Proceedings of the Royal Society of London*, **141A**, 651-666.
- Willebrand, J., Barnier, B., Boning, C., Dieterich, C., Killworth, P. D., Le Provost, C., Jia, Y., Molines, J-M., and New, A. L., 2001, Circulation characteristics in three eddy-permitting models of the North Atlantic: *Progress in Oceanography*, **48**, 123-161.
- Ozgokmen, T. M., and Chassignet, E., 2002, Dynamics of two-dimensional turbulent bottom gravity currents: *Journal of Physical Oceanography*, **32**, 1460-1478.
- Ozgokmen, T. M., Fischer, P., Duan J., and Iliescu, T., 2004, Three dimensional turbulent bottom density currents from a high-order nonhydrostatic spectral element model: *Journal of Physical Oceanography*, **34**, 2006-2026.
- Ozgokmen, T. M., Johns, W., Peters, H., and Matt, S., 2003, Turbulent mixing in the Red Sea outflow plume from a high resolution nonhydrostatic model: *Journal of Physical Oceanography*, **33**, 1846-1869.
- Pedlosky, J., 1987, *Geophysical fluid dynamics*: Springer-verlag, New York.
- Price, J. F., and Yang, J., 1998, Marginal sea overflows for climate simulations: *Ocean Modelling and Parameterization*, E. P. Chassignet and J. Verron, Eds., Kluwer Academic, 155-170.
- Price, J. F. and Baringer, M. O., 1994, Outflows and deep water production by marginal seas: *Progress in Oceanography*, **33**, 161-200.
- Price, J. F., Baringer, M. O., Lueck, R. G., Johnson, G. C., Ambar, I., Parrilla, G., Cantos, A., Kennelly, M. A., and Sanford, T. B., 1993,