



ORIGINAL RESEARCH PAPER (Marine Science)

Numerical Solution of the Geostrophic Mesoscale Eddy in the Shallow Water Model

Somayeh Darskhan¹, Maryam Soyuf Jahromi^{1,*}¹ Department of Nonliving Resources of Atmosphere and Ocean, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ABSTRACT

Code: A-10-1143-2

Received: 2021/04/17

Revised: 2021/06/28

Accepted: 2021/07/1

KEYWORDS:

Numerical Solution

Eddy

Mesoscale

Shallow Water Model

*Corresponding author

✉ soyufjahromi@yahoo.com.au

☎ (+98917) 3914373

Background and Objectives: Geostrophic currents profoundly influence various oceanographic events and different interactive processes between the atmosphere and the ocean. According to satellite images, eddies of Persian Gulf with an average diameter of 40-90 km and a speed of 3-6 cm/s, have been observed mostly near the coasts of Bushehr and the central part of the Persian Gulf. Hence, by the purpose of numerical solution, a geostrophic eddy current is dissolved in one layer fluid model called the shallow water model.

Methods: The present study uses numerical solutions for geostrophic equations provided by the Woods Hole Oceanographic Institution, entitled "Coriolis Guide" by James F. Price and is available in four separate sections for free research studies. It can cover basic equations based on the Coriolis force (such as the geostrophic equations). Using dynamic realities such as ocean shallowness, hydrostatic approximation, and the relatively constant nature of the vertical structure of the ocean, a geostrophic eddy is solved in MATLAB software based on the geostrophic equations. The origin of the coordinate system is on the center of the eddy and the results are plotted along the diameter of the eddy. The Coriolis parameter, f , is constant (f -plane coordinate system) and the friction is ignored. In this numerical solution, the finite difference numerical method has been used and the model development has been done on a structured grid and regular rectangular shape. The studies have been performed at latitude 28°N (similar to the Persian Gulf) for a geostrophic eddy with a width of 50 km and a peak height of 3 m relative to its sides. In this numerical solution, the eddy properties of the Persian Gulf are tested as much as possible. The simulation is performed as a dense layer of fluid with a rectangular peak for 10 days from the initial time of zero and from a standstill (initial velocity of zero in the center of the peak). The energy source for the eddy activity is provided by the potential energy stored in the initial stationary state of the fluid package. Therefore, the total energy is stored in this shallow water model.

Findings: The Rossby deformation radius was 28.5 km and eddy velocity was 0.029 m/s, which was in good agreement with the satellite images of previous studies. The results show that due to the approximation of the geostrophic current, the resulting eddy shape is symmetrical and Gaussian. The eddy peak begins to fall by the release of the initial rectangular peak, at zero time for a few seconds under gravity at the beginning of the simulation, and it releases potential energy and produces a current. The current moves at a constant speed in the eddy. Moreover, at the beginning of the simulation, many instabilities are observed on the water surface and around the main geostrophic ring, which as the end of the simulation approaches, these pulses almost disappear and only the main geostrophic ring of eddy remains relatively stable. In addition, the initial rectangular eddy becomes a soft curved eddy. The results show well the two opposite directions of (horizontal components of) velocities at the right and left of the center of the geostrophic eddy. By shifting along the current due to the right and left of the geostrophic eddy ring relative to its center, a vortex is created that creates rotation for a balanced geostrophic eddy. Kinetic energy and potential energy will be equal on the last day of the simulation when the model reaches a steady state and perturbations on the basin surface disappear.

Conclusion: From the results, it can be clearly seen that the Coriolis force and gravity lead to an eddy with a geostrophic equilibrium. By changing the vertical intensity of the fluid column strength, the rotation speed of the eddy also changes, and the larger eddy diameters have more energy.



NUMBER OF TABLES

1



NUMBER OF FIGURES

12



NUMBER OF REFERENCES

17

حل عددی ادی میان مقیاس زمینگردی در مدل آب کم عمق

سمیه درس خوان^۱، مریم سیوف جهرمی^{۱*}^۱ گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،

چکیده

پیشینه و اهداف: جریان زمینگردی می‌تواند عمیقاً بر روی وقایع مختلف اقیانوس‌شناسی و فرآیندهای تعاملی مختلف بین جو و اقیانوس تأثیر بگذارد. براساس تصاویر ماهواره‌ای ادی‌های خلیج فارس با قطر متوسط ۴۰-۹۰ km و سرعت ۳-۶ cm/s، بیشتر در نزدیکی سواحل بوشهر و بخش مرکزی خلیج فارس مشاهده شده‌اند. از این رو، با هدف حل عددی، یک ادی جریان زمینگردی در یک مدل سیال یک لایه که مدل آب کم عمق نامیده می‌شود، حل می‌شود.

روش‌ها: تحقیق حاضر که با استفاده از حل عددی معادلات زمینگردی که توسط موسسه اقیانوسی Woods Hole ارائه شده است، با عنوان «راهنمای کوریولیس» که توسط James F. Price تدوین شده و در چهار بخش مجزا به صورت رایگان جهت مطالعات پژوهشی ارائه شده است، می‌تواند معادلات پایه‌ای که براساس نیروی کوریولیس هستند (مانند معادلات زمینگردی) را پوشش دهد. با بکارگیری واقعیت‌های دینامیکی مانند کم عمق بودن اقیانوس، تقریب هیدرواستاتیک و ویژگی نسبتاً ثابت ساختار عمودی اقیانوس، ادی زمینگردی در نرم‌افزار MATLAB براساس معادلات زمینگردی حل می‌شوند. مبدا دستگاه مختصات روی مرکز ادی و رسم نتایج در راستای قطر ادی است. پارامتر کوریولیس f ، ثابت (دستگاه مختصات f -plane) است و از اصطکاک صرف‌نظر می‌شود. در این حل عددی، از روش عددی تفاضل محدود استفاده شده است و توسعه مدل روی شبکه باسازمان و منظم مستطیل شکل انجام گرفته است. بررسی‌ها در عرض جغرافیایی $28^{\circ}N$ ، (مشابه خلیج فارس) برای یک ادی زمینگردی با پهنا 50 km و ارتفاع قله‌ای برابر با 3 m نسبت به طرفین آن انجام شده است. در این حل عددی تا جای ممکن ویژگی‌های ادی خلیج فارس مورد آزمایش قرار گرفته است. شبیه‌سازی به صورت لایه‌ای متراکم از سیال با قله مستطیلی شکل، به مدت ۱۰ روز از زمان اولیه صفر و از حالت سکون (سرعت اولیه صفر در مرکز قله) اجرا گردیده است. منبع انرژی برای فعالیت ادی از انرژی پتانسیل ذخیره شده در حالت سکون اولیه بسته سیال فراهم می‌شود. بنابراین کل انرژی در این مدل آب کم عمق حفظ می‌شود.

یافته‌ها: شعاع تغییر شکل راسبی برابر با $28/5\text{ km}$ و سرعت ادی، برابر $0/29\text{ m/s}$ به دست آمد که در توافق خوبی با تصاویر ماهواره‌ای مطالعات گذشته بود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با توجه به تقریب زمینگردی بودن جریان، شکل ادی حاصل بصورت متقارن و گاوسی است. در ابتدای شبیه‌سازی با آزاد شدن قله مستطیل شکل اولیه در زمان صفر طی مدت زمان چند ثانیه تحت نیروی جاذبه، قله شروع به ریزش می‌کند و باعث آزاد شدن انرژی پتانسیل و تولید جریان می‌شود و جریان با سرعتی ثابتی در ادی حرکت می‌کنند. همچنین در ابتدای شبیه‌سازی، ناپایداری‌های زیادی در سطح آب و در اطراف حلقه اصلی زمینگردی مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن به انتهای شبیه‌سازی، این پالس‌ها تقریباً از بین می‌روند و تنها حلقه اصلی ادی زمینگردی به صورت نسبتاً پایدار باقی می‌ماند. به علاوه، ادی مستطیل شکل اولیه به یک ادی نرم منحنی شکل تبدیل می‌شود. نتایج به خوبی دو سرعت جریان در جهت مخالف یکدیگر (مولفه‌های سرعت افقی) در سمت راست و چپ نسبت به مرکز ادی زمینگردی نشان می‌دهند. با تغییر مکانی جریان در سمت راست و چپ حلقه ادی زمینگردی نسبت به مرکز آن، تاوایی ایجاد می‌شود که چرخش را برای ادی متعادل زمینگردی ایجاد می‌کند. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل در آخرین روز شبیه‌سازی که مدل به یک حالت پایدار می‌رسد و اغتشاشات در سطح حوضه از بین می‌رود، برابر خواهند بود.

نتیجه‌گیری: از نتایج، به خوبی دیده می‌شود نیروی کوریولیس و گرانش منجر به یک ادی با تعادل زمینگردی می‌شود. با تغییر میزان کشیدگی قائم ستون سیال، سرعت چرخش ادی نیز تغییر می‌کند و ادی‌های با قطر بزرگتر، انرژی بیشتری دارند.

تاریخ دریافت: ۲۸/۱/۱۴۰۰

تاریخ اصلاح: ۸/۱/۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱۰

واژگان کلیدی:

حل عددی

ادی

میان‌مقیاس

مدل آب کم عمق

*نویسنده مسئول

✉soyufjahromi@yahoo.com.au

مقدمه

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2\Omega v \sin \phi + F_x \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - 2\Omega u \sin \phi + F_y \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - 2\Omega w \cos \phi - g + F_z \quad (3)$$

با در نظر گرفتن فرض‌های حرکت بدون شتاب (رابطه ۴) و سرعت‌های افقی، بسیار بزرگتر از عمودی (رابطه ۵)، می‌توان معادلات تعادل زمینگرد را از معادلات ناویر-استوکس به دست آورد (۶). این روابط به صورت روابط (۶) الی (۱۱) ارائه شده‌اند که بیانگر معادلات زمینگرد هستند.

$$du/dt = dv/dt = dw/dt = 0 \quad (4)$$

$$w \ll u, v \quad (5)$$

$$\frac{\delta p}{\delta x} = \rho f v \quad (6)$$

$$\frac{\delta p}{\delta y} = -\rho f u \quad (7)$$

$$\frac{\delta p}{\delta z} = -\rho g \quad (8)$$

$$u = -\frac{1}{f\rho} \frac{\delta p}{\delta x} \quad (9)$$

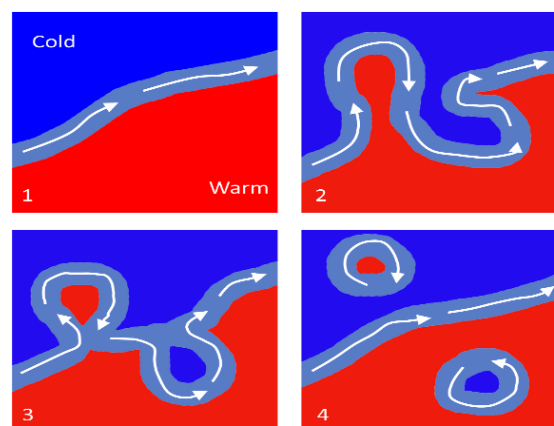
$$v = \frac{1}{f\rho} \frac{\delta p}{\delta y} \quad (10)$$

$$p = p_0 + \int_{-h}^{\xi} g(\varphi, z) \rho(z) dz \quad (11)$$

در اینجا ρ فشارآب، Ω و ϕ به ترتیب مولفه‌های سرعت جریان زمینگرد در راستای مداری و نصف‌النهاری هستند. f پارامتر کوریولیس و برابر با $f = 2\Omega \sin \phi$ ، g شتاب ثقل، φ عرض جغرافیایی و Ω سرعت زاویه‌ای چرخش زمین به دور خود و برابر با 2π رادیان بر یک روز نجومی یا 7.292×10^{-5} rad/s است. لازم به ذکر است که زمان نجومی یا روز نجومی، اندازه‌گیری حرکت وضعی زمین بر اساس عبور متوالی یک ستاره ثابت یا به اعتباری دیگر نقطه اعتدال بهاری (یا یک نصف النهار خاص) است که به آن شبانه روز نجومی هم می‌گویند.

مطالعات زیادی در زمینه ادی‌های خلیج فارس صورت گرفته است که اغلب بر مشاهده این نوع ادی‌ها در داده‌ها و یا مدل‌های خلیج فارس اشاره دارد. به طور کلی، گردش آب خلیج از سطح دریای عمان و از سمت سواحل ایران از طریق تنگه هرمز به بالادست خلیج فارس جریان می‌یابد و آب نسبتاً شورتر خلیج فارس از لایه‌های پایینی و از سمت کشور عمان به خلیج عمان می‌ریزد (۷) و یک چرخش ادی‌گونه را شکل می‌دهد. ترابی‌آزاد و همکاران (۸) با استفاده از دو گشت تحقیقاتی قدس و فردوس و جمع‌آوری اطلاعات گشت تحقیقاتی مونت میشل (Mt-Mitchell Cruise, 1992) به همراه تصاویر ماهواره‌ای، قطر متوسط ادی‌های خلیج فارس را ۴۰-۹۰ km و سرعت آن‌ها را ۳-۶ cm/s برآورد کردند. بر اساس مشاهدات این پژوهش، بیشتر ادی‌های تشکیل شده در نزدیکی سواحل بوشهر و بخش مرکزی خلیج فارس واقع بودند. مرجع (۹) به مطالعه جریان و

ادی‌های میان‌مقیاس نقش موثری در انتقال انرژی، تکانه، اکسیژن، آلودگی، مواد مغذی و همچنین اختلاط دارند که لزوم مطالعه دقیق آنها ایجاب می‌شود. مطالعه ادی‌ها شامل بررسی علت و نحوه شکل‌گیری آن‌ها، عوامل موثر بر رشد یا اضمحلال آن‌ها و تاثیر آن‌ها بر دینامیک محیط پیرامون خود می‌باشد. ادی‌ها به حلقه‌هایی اطلاق می‌شوند که در حاشیه یک جریان اصلی در اثر ناپایداری تشکیل می‌شوند. از برهم‌کنش ادی‌ها با هر جریان دیگر اقیانوسی، اغتشاش و تلاطم ایجاد می‌گردد. بنابراین خواص فیزیکی یک ادی سریعاً نسبت به زمان و مکان تغییر می‌نماید (۱). مقیاس زمانی یک چرخش ادی معمولاً ۳۰-۱۰۰ روز در اقیانوس است و مقیاس افقی آن ۱۰۰-۱۰ کیلومتر می‌باشد (۲). شکل ۱، چگونگی تشکیل یک ادی را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌گردد، وقتی یک حرکت از جریان اصلی به دامنه مناسب می‌رسد، یک بسته (Pocket) ایجاد می‌شود که به تدریج انتهای بسته محدود شده و در نهایت از جریان اصلی جدا می‌گردد. سرعت این ادی جدا شده با سرعت جریان اصلی آب یکسان است (۳).



شکل ۱. چگونگی شکل‌گیری و جداسازی یک ادی از جریان اصلی. حلقه‌های هسته گرم در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخند، در حالی که حلقه‌های هسته سرد در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخند (۳).

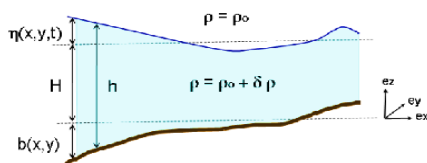
Fig 1. It shows how an eddy is formed and separated from the mainstream. Warm core rings rotate counterclockwise, while cold core rings rotate counterclockwise [3].

ادی‌های میان‌مقیاس با تعادل زمینگرد پایدار می‌شوند، به طوری که نیروهای گرانشی در آن‌ها با نیروی کوریولیس جبران می‌شود (۴). جریان‌های زمینگرد یا ژئوستروفیک (Geostrophic currents)، نیز بخش بزرگی از جریان‌های اقیانوسی است که نقش عمده‌ای در تغییرات آب و هوایی ایفا می‌نمایند. جریان‌های زمینگرد به دلیل تعادل گرادیان فشار و نیروی کوریولیس ایجاد می‌شوند و عامل اصلی در ایجاد جریان‌های بزرگ مقیاس هستند (۵). معادلات حرکت براساس اصل پاستگی تکانه به دست می‌آیند که به معادلات ناویر-استوکس (Navier-Stokes) (روابط ۱ الی ۳) مشهورند (۶).

و جریان‌های سواحل ایران به دلیل ناپایداری باروکلینیکی تبدیل به ادی‌هایی در سطح میان‌مقیاس می‌شود و یکی از منابع انرژی برای ایجاد ناپایداری انرژی پتانسیل ذخیره شده در خطوط شیب هم چگال است که در اثر ناپایداری باروکلینیکی آزاد می‌شود. ادی‌ها، در مطالعات محلی هم دیده می‌شوند که اغلب به عنوان الگوی چرخش محلی آن منطقه هم یاد شده‌اند. از آن جمله می‌توان به مطالعه (۱۳) اشاره کرد. هدف اصلی این تحقیق حل عددی معادلات زمینگرد براساس معادلات (۱۴) است که به صورت کوششی در راستای کدنویسی معادلات (۱۵)، جهت تحلیل ادی حاصل از تعادل زمینگردی خواهد بود تا به این وسیله نقش شعاع ادی زمینگردی در سرعت جریان و انرژی حاصله در عرض جغرافیایی خلیج فارس مورد بازمی‌نگار قرار گیرد. از آنجایی که خلیج فارس ویژگی‌های دینامیکی جالبی دارد و حضور جریان‌ها و الگوی بسیار متمایز ادی‌ها از خصوصیات محیطی آن منطقه به شمار می‌رود، لذا این مطالعه در راستای مطالعه خصوصیات فیزیکی و مکانیزم دینامیکی این ادی‌ها حائز اهمیت خواهد بود.

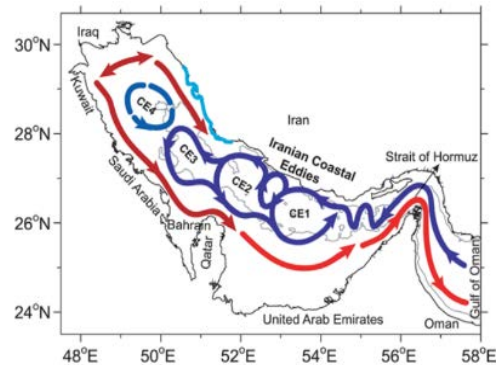
روش پژوهش

اساس و چهارچوب این پژوهش بر حل معادلات زمینگردی است که توسط موسسه اقیانوسی Woods Hole (نسخه ۸) با عنوان «راهنمای کوریولیس» در چهار بخش مجزا (۱۵-۱۸) ارائه داده است. این نسخه، برای اولین بار در ژانویه سال ۲۰۰۱ توسط Price ارائه شد که پس از آن به تدریج تکمیل گردید و هم اکنون نسخه ۸ آن جهت مطالعات پژوهشی به صورت رایگان در دسترس است (۱۶). جریان زمینگرد در یک مدل سیال تک‌لایه‌ای از مدل آب کم‌عمق نوشته می‌شود. شکل ۳، طرح‌واره‌ای از سطح آزاد مایع مدل را که روی یک مرز با عمق متغیر نشان می‌دهد. این لایه می‌تواند به عنوان مثال یک اقیانوس همگن باشد و فرض می‌شود که سطح لایه آزاد در حالت افقی (x, y) متغیر باشد. در حالت عمودی فرض می‌شود که توپوگرافی به صورت تابع $z = -b(x, y)$ است و برای آسان‌سازی مسأله فرض می‌شود که کف دریا صاف است $(b=0)$. جابه‌جایی عمودی سطح بالایی نسبت به سطح آزاد $\eta(x, y, t)$ که با توجه به مکان‌های افقی و زمان‌های متفاوت، مختلف خواهد بود. همچنین سیال ضخامت H دارد. در شبیه‌سازی حاضر ویژگی‌های مانند کف دریا، همگنی آب، η و ضخامت سیال براساس مدل سیال یک لایه‌ای و معادلات مطرح شده در (۱۴) طراحی می‌شود.



شکل ۳. یک مدل آب کم عمق [۱۶].
Fig 3. A shallow water model [16].

ادی‌های خلیج فارس با استفاده از مدل Hybrid Coordinate Ocean Model با علامت اختصار HYCOM پرداختند. آن‌ها اعلام کردند که جریان به سمت شمال غرب سواحل ایران ناپایدار است که نتیجه‌ای از ناپایداری چگال‌گرایی (Baroclinic) است. در این تحقیق یک سری جریانات چرخه‌ای مشاهده شد که قطر آن‌ها بین ۱۳۰-۱۱۵ و شعاع تغییر شکل راسبی باروکلینیکی را بین ۳۰-۲۵ تخمین زدند. شکل ۲ دیاگرام شماتیک این گردش‌ها را نشان می‌دهد که توسط آن‌ها ارائه شده است. در مطالعه (۱۰) نیز با استفاده از مدل‌سازی HYCOM گردش و تغییر جرم آب، خلیج فارس و تبادل آن با اقیانوس هند از طریق تنگه هرمز را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ادی‌هایی با اندازه‌های در حدود ۱۰۰ km در امتداد جبهه شوری در تابستان مشاهده کردند و شعاع تغییر شکل راسبی را ۳۰ km برای خلیج فارس برآورد کردند. در نتیجه، طبق مطالعات انجام شده در خلیج فارس، قطر اغلب ادی‌های میان‌مقیاس خلیج فارس در حدود ۵۰ km تا ۱۳۰ km با شعاع تغییر شکل راسبی ۳۰-۲۵ می‌باشد (۸-۱۰).



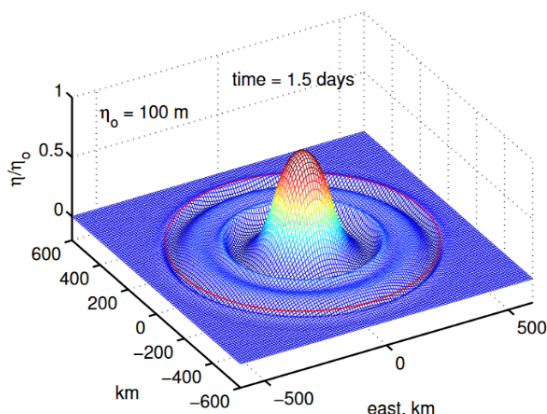
شکل ۲. دیاگرام شماتیک گردش خلیج فارس به همراه ادی‌های آن [۹]
Fig 2. Schematic diagram of the Persian Gulf with its eddies [9]

در مطالعه (۱۱)، با استفاده از مدل هیدرودینامیکی عددی سه بعدی در تحقیق خود بیان کردند تنوع زیاد جریان‌های سطحی در پاییز و زمستان نشان دهنده حضور ادی‌های میان‌مقیاس در طول خلیج فارس می‌باشند. عدد ریچاردسون^۱ در فصل‌های پاییز و زمستان بسیار کوچکتر از بهار و تابستان است و در نتیجه پایداری استاتیکی ضعیف بوده و بر اثر این ناپایداری دینامیکی، باد منجر به تولید ادی‌های میان‌مقیاس با قطر حدود ۳۰ km تا ۱۲۰ km و سرعت ۴ cm/s تا ۵ cm/s در طول خلیج می‌شود. مطالعه (۱۲) به منظور تعیین نقش ادی‌های میان‌مقیاس و جریان‌های ساحلی در مطالعات اقیانوسی و اقلیمی با استفاده از مدل عددی کوهرنس به شبیه‌سازی تاثیرگذاری جریان ساحلی بر تشکیل ادی‌های میان‌مقیاس پرداختند. آن‌ها برای تحلیل دینامیکی ادی‌ها فرض کردند که تقریب زمینگرد است و ادی‌ها را با شکل متقارن گاوسی در نظر گرفتند. سپس عملیات ردیابی را انجام دادند. نتیجه‌گیری آنها در این تحقیق به این صورت بیان شد که گردش در خلیج فارس ناشی از تغییر شکل جریان‌های سواحل ایران به چندین ادی میان‌مقیاس است

^۱ Richardson number

استفاده از تقریب هیدرواستاتیک استوار شده است به طوری که شبکه‌بندی تنها در سطح آزاد سیال و تنها به صورت یک‌بعدی و در راستای قطر ادی زمینگردی اعمال شود.

معادلات روی شبکه‌ای مستطیل شکل طراحی شده است. جهت گسسته‌سازی مکانی معادلات دیفرانسیل و حل آن‌ها از روش تفاضل محدود متکی بر روش بادسو (upwind) استفاده می‌شود. برای گام زمانی هم از روش لیپ‌فراگ (Leap Frog) استفاده می‌شود. جهت حل عددی جریان زمینگرد در این مدل سیال تک لایه‌ای به این صورت فرض می‌شود که ناهنجاری ضخامت اولیه (خط الراس اولیه) با مقیاس افقی L (به عنوان قطر ادی)، از حالت سکون رها می‌شود و تحت تأثیر جاذبه و نیروی کوریولیس شروع به حرکت می‌کند.



شکل ۵. یک و نیم (۱/۵) روز پس از شروع یک شبیه‌سازی عددی جریان زمینگرد (۱۶)

Fig 5. One and a half (1.5) days after the start of the numerical simulation of the geostrophic current [16]

وقتی که خط الراس اولیه شروع به حرکت می‌کند، حرکات به صورت دو پالس موج جداگانه و مساوی در اطراف آن شکل می‌گیرند. این پالس‌ها با سرعت ثابت و بسیار نزدیک به سرعت موج گرانشی (باروکلینیکی) $C = \sqrt{g'H}$ حرکت می‌کنند. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، این مطالعه براساس شبیه‌سازی (۱۶) بنا شده است. در شبیه‌سازی وی، ادی زمینگردی اولیه مطابق شکل ۵، با پالس‌هایی متقارن به اطراف خود منتشر می‌شود که به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ناهنجاری مایع متراکم اولیه که از حالت سکون در صفحه f رها شده است بعد از رها شدن تحت تأثیر جاذبه و چرخش ناشی از نیروی کوریولیس حرکت کرده و به تعادل می‌رسد، اما آن موج گرانشی در اطراف مرکز خود به صورت همسانگرد (Isotropically) منتشر می‌شوند. به عبارتی جبهه موج با سرعت بسیار نزدیک به سرعت موج گرانشی منبسط می‌شود. پس در نتیجه این شیوه انتشار پالس‌ها در این مطالعه، براساس مطالعه او بنا نهاده شده است. خوانندگان جهت اطلاعات بیشتر از نحوه شبکه‌سازی و انتقال پالس‌ها به فایل راهنمای مدل (۱۶) ارجاع داده می‌شوند.

با حرکت سطح آزاد مایع در هر گام زمانی، مرز شبکه طبق معادلات برای سطح آزاد تغییر می‌کند. در این شبیه‌سازی فرض می‌شود که نقاط شبکه در خارج سیال وجود ندارد. در نتیجه شبکه‌بندی مساله در هر

حل معادلات اولیه (Primitive equations) با استفاده از تقریب هیدرواستاتیک، و با شرط مرزی سطح آزاد طراحی می‌شود. برای تنظیم حرکت زمینگرد در صفحه f ، معادلات پایه حرکت زمینگردی (معادلات ۱۲ الی ۱۴) پایه‌ریزی می‌شوند، که در آن g' ، گرانش کاهش یافته و برابر با $g' = g \frac{\partial \rho}{\rho}$ ، پارامتر کوریولیس، و g شتاب گرانش است (۱۴).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g' \frac{\partial h}{\partial x} - fv = 0 \quad (12)$$

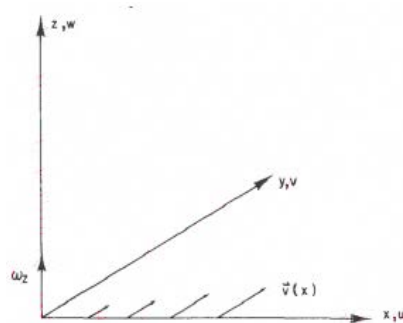
$$\frac{\partial v}{\partial t} + g' \frac{\partial h}{\partial y} + fu = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (14)$$

تاوایی نسبی در مدل آب کم عمق، از رابطه زیر به دست می‌آید که در اصل کمیتی سه بعدی است. اگر بخواهیم چرخش در یک صفحه به ازای چرخش حول محور z ، بررسی کنیم، مولفه تاوایی در راستای محور z به صورت زیر خواهد بود:

$$\xi = \nabla \times V \rightarrow \xi_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_z \quad (15)$$

مشابه با کتاب دینامیک شماره‌های ژئوفیزیکی (۱۴) (شکل ۴)، می‌توان مساله‌ای ساده به صورت خطی طراحی نمود که تنها تغییرات در راستای مولفه دیگر باشد. به عنوان مثال $u=0$ و $v=v(x)$ که مولفه دوم بردار سرعت نسبت به جهت مثبت محور x ، جا به جا می‌شود. به عبارتی بردار $v(x)$ ، اگرچه به موازات محور y است، اما بزرگی آن با توجه به موقعیتش نسبت به محور x جابه‌جا می‌شود به طوری که با افزایش x ، $v(x)$ نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، تاوایی به صورت $\xi = \frac{\partial v}{\partial x}$ وجود دارد و در نتیجه در حوضچه چرخش وجود دارد. در مساله شبیه‌سازی شده حاضر نیز که ادی یا همان پیچک است، سعی بر آن است که تغییرات سرعت در راستای یک محور، که در اینجا قطر ادی یا پیچک خواهد بود، دیده شود. برای راحتی مبدا دستگاه مختصات محور مربوطه، مرکز ادی در نظر گرفته می‌شود و تغییرات سرعت در راستای قطر ادی به نمایش گذاشته می‌شود.

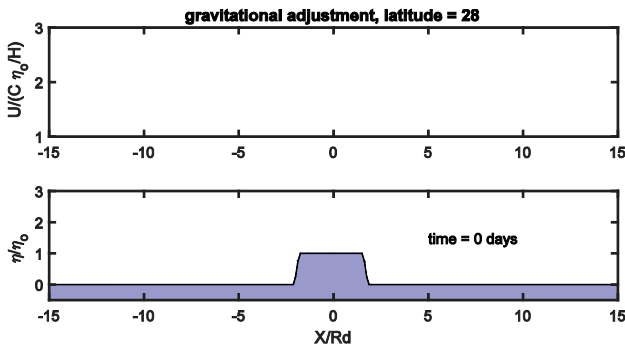


شکل ۴. تاوایی در یک جریان (شارش) برشی در جهت محور x [۱۴].

Fig 4. Vorticity in a shear flow along the x -axis [14].

همچنین سیال را ایده‌آل فرض می‌کنیم یعنی فشار هیدرواستاتیک است و انتقال تکانه تنها توسط جریان سیال است. گستره وسیعی از فرآیندهای فیزیکی مرتبط با خصوصیات ترمودینامیکی یک مایع واقعی مانند تراکم‌پذیری، انتشار و چسبندگی، هم صرف‌نظر می‌شود. از این رو، شبیه‌سازی براساس معادلات اولیه زمینگردی (معادلات ۱۲ الی ۱۴) و

۱۰)، قطر اغلب ادی‌های میان‌مقیاس خلیج فارس در حدود ۱۳۰ km-۵۰ و شعاع تغییر شکل راسی برابر با ۲۵-۳۰ km است، لذا طول ادی حاصل از جریان زمینگرد، ۵۰ km در نظر گرفته می‌شود که با مشاهدات خلیج فارس تطابق داشته باشد. ارتفاع قله ادی نسبت به طرفین آن برابر با ۳ m فرض می‌شود. شبیه‌سازی به صورت لایه‌ای متراکم از سیال (با عمق قابل تغییر) به مدت ۱۰ روز از زمان اولیه صفر ($t=0$) در مرکز قله ادی، از حالت اولیه نسبتاً مستطیل شکل آغاز می‌شود (شکل ۶). گام زمانی برابر با $\Delta t=365$ S و گام مکانی برابر با $\Delta x=3/5$ km در نظر گرفته شد. عمق منطقه برابر با ۲۰۰ m در نظر گرفته شد. البته عمق متوسط خلیج فارس ۳۵ m است (۱۹) و لذا این مساله با واقعیت خلیج فارس تطابق ندارد و به عنوان ضعف شبیه‌سازی برای خلیج فارس شناخته می‌شود. علت این‌که عمق را برابر با ۲۰۰ m در این شبیه‌سازی در نظر گرفتیم آن بود که می‌خواستیم انتشار نوسانات و پالس‌های مربوط به ادی مستقل از اثرات عمق باشد. در نتیجه سرعت موج گرانشی در مدل برابر با $1/9509$ متر بر ثانیه به دست می‌آید.



شکل ۶. جریان زمینگرد و سطح آب آغاز شبیه‌سازی.

Fig 6. The geostrophic current and the water level at the start of the simulation.

برای بدست آوردن پایداری مدل، عدد کورانت (Courant-Friedrichs-Lewy condition با علامت اختصار CFL) برابر با 0.2 به دست می‌آید که کمتر از عدد یک است و شرط پایداری را ارضا می‌کند. از آنجایی که این شبیه‌سازی به صورت یک‌بعدی است و منطقه خاصی را تحت پوشش قرار نمی‌دهد و شبیه‌سازی تا جای ممکن براساس ویژگی‌های ادی خلیج فارس طراحی شده است، لذا نتایج براین اساس تحلیل می‌شود و صحت‌سنجی و اعتبارسنجی به معنای واقعی در این شبیه‌سازی صورت نگرفته است.

بحث

شکل ۷، نتیجه شبیه‌سازی را در روز اول شبیه‌سازی برای سرعت و سطح آب برای عرض جغرافیایی $28^\circ N$ (محدوده خلیج فارس) نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، سیال از حالت اولیه سکون توانسته است به خوبی حرکت کند و سرعتی در سمت چپ و راست ادی به صورت متقارن (با بیشینه سرعت کمتر از 0.5 متر بر ثانیه) تشکیل دهد. به علاوه، ظاهر ادی از حالت مستطیلی اولیه (شکل ۶، پایین)، تغییر

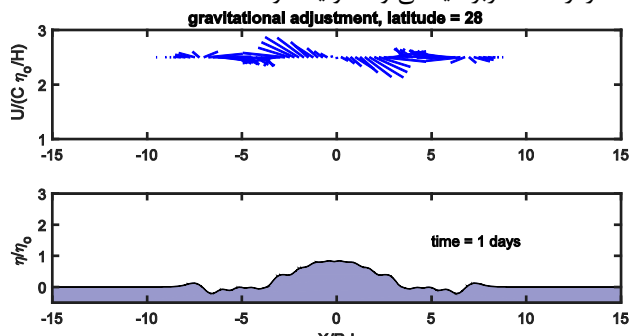
مرحله از محاسبات در حلقه برنامه ساخته می‌شود. با ثابت در نظر گرفتن f و حذف اصطکاک، چون فرض می‌شود که ادی با نیروی کوریولیس و گرانش به تعادل در جریان زمینگرد برسد، سعی می‌شود که مقیاس افقی به اندازه کافی بزرگ (در حدود ۱۰۰ کیلومتر یا بیشتر) باشد. این مقیاس بزرگ افقی را در این شبیه‌سازی ۲۰ برابر قطر ادی از طرفین ادی (جمعاً ۴۱ برابر طول قطر ادی) در نظر گرفتیم تا امکان انتشار پالس‌ها در حوضه وجود داشته باشد. از آنجایی که قطر ادی زمینگردی خلیج فارس در حدود ۵۰ km الی ۱۳۰ km (۸-۱۰) است، لذا فاصله افقی ۲۰ برابر قطر ادی، فضایی به اندازه کافی بزرگ برای حل این مساله خواهد بود. به علاوه، چون با استفاده از قانون آنالیز ابعادی، داده‌های مدل را به داده‌های نمونه واقعی می‌توان ربط داد، از این رو متغیرهایی مانند تراز سطح آب و سرعت جریان زمینگرد بی‌بعدسازی می‌شوند تا باعث ساده شدن مسئله و محاسبات مربوطه در حلقه اصلی برنامه شود.

از طرفی دیگر، ادی‌ها به لحاظ انرژی جنبشی غالبی که دارند در تعیین انرژی جنبشی اقیانوس‌ها نقش مهمی دارند. تعادل انرژی یک قانون اساسی فیزیک است که گاهی اوقات می‌تواند در تجزیه و تحلیل جریان سیال مفید باشد. انرژی مکانیکی (با علامت اختصار EKE)، مجموع انرژی جنبشی (با علامت اختصار KE) و پتانسیل (با علامت اختصار PE) است $(EKE=KE+PE)$. انرژی جنبشی (در واحد جرم)، برابر با $KE = 1/2 \rho V^2$ و انرژی پتانسیل (در واحد سطح) برابر با $PE = g' \int_0^{\eta} z dz = 1/2 g' \eta^2 + const$ است. این روابط در کدنویسی مدل وارد می‌شود تا بتوان انرژی ادی زمینگردی را محاسبه نمود. در اینجا تعادل انرژی بر روی یک حجم کنترل ثابت ارزیابی می‌شود که اغلب اوقات تعادل اوپلری نامیده می‌شود. اگر ناهنجاری فشار روی مرز از یک حجم کنترل مثبت باشد در این صورت مایع موجود در داخل حجم کنترل، فشار بر روی سیال خارج از حجم کنترل وارد می‌کند. به این ترتیب، انرژی موجود در حجم کنترل کاهش می‌یابد، در حالی که انرژی خارج از حجم کنترل افزایش می‌یابد. بنابراین امواج گرانش شبیه‌سازی با آزاد شدن ناهنجاری ضخامت آب متراکم از زمان $t=0$ شروع می‌شوند. در زمان‌های اولیه، خط الراس تحت فشار گرانش شروع به حرکت می‌کند، انرژی پتانسیل را آزاد می‌کند و جریان تولید می‌کند.

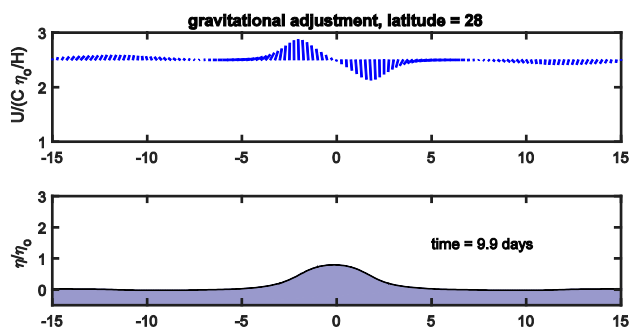
سنجش و بررسی کدهای نوشته شده در محیط MATLAB صورت خواهد پذیرفت. منطقه مورد نظر برای در عرض جغرافیایی $28^\circ N$ ، یعنی محدوده خلیج فارس جهت محاسبات f تنظیم می‌شود. چون مدل به صورت یک بعدی و در راستای قطر ادی، و محدوده‌ای بزرگتر از ۲۰ برابر شعاع تغییر شکل راسی حل می‌شود، لذا از پیچیدگی‌های مکانی خلیج فارس صرف‌نظر می‌شود و تنها اثر عرض جغرافیایی آن بر پارامتر کوریولیس در نظر گرفته می‌شود. چون طبق مطالعات انجام شده (۸-)

شکل می‌دهد و به صورت نسبتاً منحنی (شکل ۷، پایین) در می‌آید. هرچه از زمان آغاز شبیه‌سازی فاصله گرفته می‌شود، تغییر شکل ظاهری ادی در شبیه‌سازی به صورت نرم‌تر اتفاق می‌افتند به طوری که در روز آخر شبیه‌سازی (روز دهم)، شکل ظاهری ادی بسیار صاف و منحنی شکل می‌شود (شکل ۸). سرعت سیال در طرفین مرکز ادی هم در روز دهم شبیه‌سازی بسیار نرم می‌شود، اگرچه مجدد همان بیشینه سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه می‌تواند تولید شود.

شکل ۷. جریان زمینگرد (بالا) و سطح آب (پایین) در روز اول شبیه‌سازی.

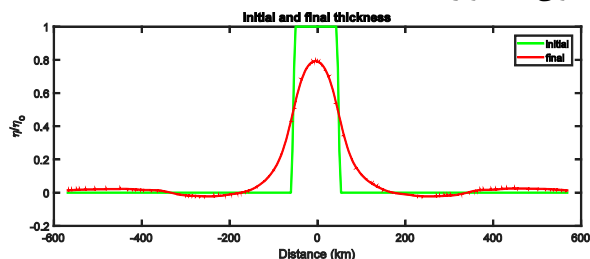


شکل ۷. جریان زمینگرد (بالا) و سطح آب (پایین) در روز اول شبیه‌سازی.
Fig 7. The geostrophic current (up) and the water level (down) on the first day of the simulation.



شکل ۸. جریان زمینگرد (بالا) و سطح آب (پایین) در روز آخر شبیه‌سازی.
Fig 8. The geostrophic current (up) and the water level (down) on the last day of the simulation.

پس در نتیجه اگرچه در ابتدای شبیه‌سازی (شکل ۷) ناپایداری‌هایی در سطح آب، وجود دارد که در روزهای انتهایی برطرف می‌شود (شکل ۸). به عبارتی با گذر زمان، ناهنجاری اولیه از حالت مستطیل شکل، به برآمدگی کاملاً یکنواختی تبدیل می‌شود. این نتیجه‌گیری در (شکل ۹) به خوبی به تصویر کشیده شده است.



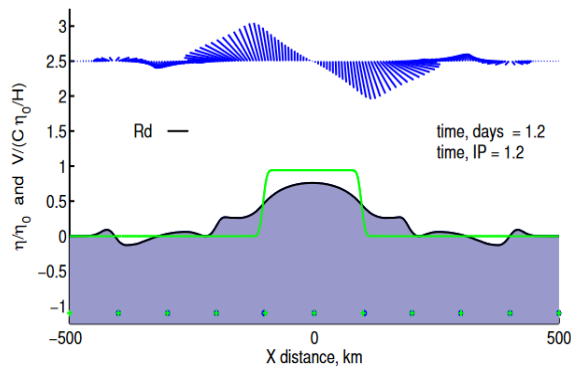
شکل ۹. مقایسه تغییرات سطح آب در روز آغاز شبیه‌سازی و آخرین روز شبیه‌سازی
Fig 9. The comparison between water level changes on the start day of the simulation and the last day of simulation.

جدول ۱: مقایسه متوسط انرژی مکانیکی بر واحد جرم (m^2/s^2) از ادی شبیه‌سازی شده در سه قطر متفاوت.

Table 1: The comparison of the average mechanical energy per unit mass (m^2/s^2) of the simulated eddy in three different diameters.

روز شبیه‌سازی (Simulation Day)	قطر ادی (Eddy diameter) (km)		
	100	75	50
اول (First)	4.7785	3.5798	2.3794
دوم (Second)	4.7293	3.5329	2.3174
سوم (Third)	4.7004	3.5071	2.2753
چهارم (Fourth)	3.6369	3.4608	2.2252
پنجم (Fifth)	4.5577	3.3772	2.1413
ششم (Sixth)	4.5100	3.3147	2.0262
هفتم (Seventh)	4.4892	3.2478	1.9492
هشتم (Eighth)	4.4467	3.1831	1.8938
نهم (Ninth)	4.4000	3.1316	1.8555
دهم (Tenth)	4.3580	3.0923	1.8279
میانگین ده-روزه (Ten-days average)	4.5601	3.3420	2.0884

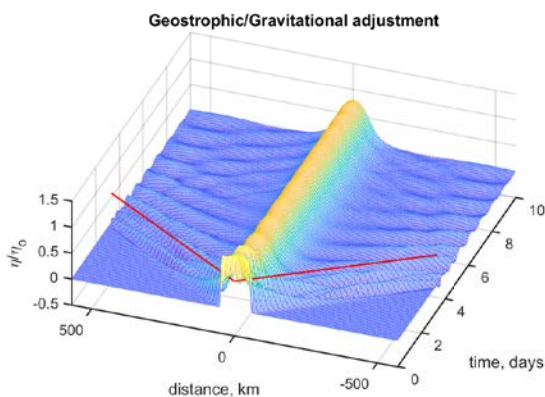
جدول ۱، میانگین انرژی را برای سه قطر متفاوت از ادی برحسب زمان را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول مشخص است که برای هر قطر مشخص، انرژی ادی در روزهای اول شبیه‌سازی بیشترین مقدار دارد و با گذر زمان از مقدار آن کاسته می‌شود که به نوعی بیانگر تمایل مدل به یکنواخت شدن جریان و پایداری مدل حکایت دارد. از طرفی با مقایسه انرژی ادی در قطرهای مختلف مشخص می‌شود که رابطه



شکل ۱۱. این شکل مربوط به زمان ۱/۲ روز بعد از رها شدن بسته مستطیل شکل اولیه از حالت سکون است. خط سبز رنگ جابه‌جایی اولیه سیال را نشان می‌دهد (۱۶).
Fig 11. This figure corresponds to the time 1.2 days after the release of the original rectangular package from a standstill state. The green line shows the initial displacement of the fluid [16].

یافته‌ها

زمانی که سیال از حالت اولیه سکون حرکت کند، سرعت‌هایی در سمت چپ و راست ادی به صورت متقارن تشکیل می‌شود. به علاوه، ظاهر ادی از حالت مستطیلی اولیه تغییر شکل می‌دهد و به صورت نسبتاً منحنی در می‌آید. هرچه از زمان آغاز شبیه‌سازی فاصله گرفته می‌شود، تغییر شکل ظاهری ادی در شبیه‌سازی به صورت نرم‌تر اتفاق می‌افتد به طوری که در روز آخر شبیه‌سازی (روز دهم)، شکل ظاهری ادی بسیار صاف و منحنی شکل می‌شود. سرعت سیال در طرفین مرکز ادی هم در روز دهم شبیه‌سازی بسیار نرم می‌شود. شکل ۱۲، نموداری سه بعدی از ادی اصلی در گذر زمان را نشان می‌دهد که تغییرات قله ادی از حالت انتشار مستطیل شکل اولیه به حالت یکنواخت منحنی شکل با گذر زمان نشان می‌دهد. خط قرمز نشان داده شده در شکل ۱۲، بیانگر شیب سرعت موج گرانشی است که برای منطقه فرضی خلیج فارس برابر $1/95.09 \text{ m/s}$ محاسبه شده است و منبع انرژی برای فعالیت ادی از انرژی پتانسیل ذخیره شده در حالت سکون اولیه بسته سیال فراهم می‌شود.



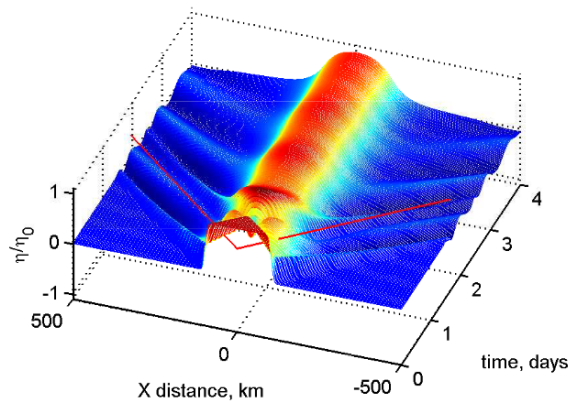
شکل ۱۲. نحوه تغییر شکل ادی مستطیل شکل (زمان آغاز شبیه‌سازی) به حالت منحنی شکل (انتهای شبیه‌سازی) با گذر زمان به صورت سه بعدی در مدل.

Fig 12. It shows in three-dimensions how a rectangular eddy (at the start time of the simulation) changes to a curved shape (at the end of the simulation) during times in the model.

مستقیمی بین انرژی ادی و پهنای ادی وجود دارد، به طوری که ادی‌های بزرگتر انرژی بیشتری دارند و با سرعت بیشتری می‌چرخند. با توجه به جدول ۱، با افزایش قطر ادی زمینگردی انرژی آن نیز در حدود ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

سرعت ادی برای عرض جغرافیایی 28°N توسط مدل برابر 0.29 m/s بر ثانیه محاسبه می‌شود که با تحقیقات انجام شده در این زمینه مانند مرجع (۲۰) که در محاسبه جریان زمینگرد خلیج فارس، سرعت آن را در منطقه خلیج فارس در حدود 0.28 m/s متر بر ثانیه برآورد نمودند، تطابق دارد. همچنین مرجع (۸)، سرعت ادی‌ها خلیج فارس را ۳-۶ سانتی متر بر ثانیه (معادل با $0.06 - 0.03 \text{ m/s}$) برآورد نمودند. با اجرای مدل، شعاع تغییر شکل راسبی برای عرض 28°N را $28/5$ کیلومتر محاسبه شد که با مطالعات گذشته (۸-۱۰) مطابقت دارد. به عبارتی میانگین قطر اغلب ادی‌های میان‌مقیاس خلیج فارس در حدود 50 km تا 130 km و شعاع تغییر شکل راسبی $25-30 \text{ km}$ به دست آمده است که با این مطالعه مطابقت دارد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نتایج حاصل از اجرا کد جریان زمینگرد یک بعدی در صفحه f است که (۱۶) با توجه به راهنمای حل معادلات زمینگردی ارائه کردند. اجرای این کد در عرض 30°N واقع در اقیانوس اطلس شمالی بوده است. مقایسه این دو شکل با شکل‌های ۱۰ و ۷، به خوبی نشان می‌دهد که بین کدهای نوشته شده توسط (۱۶) و تحقیق ما تطابق خوبی وجود دارد.



شکل ۱۰. تصویری سه بعدی از نحوه تغییر شکل ادی مستطیل به حالت منحنی شکل با گذر زمان (۱۶).

Fig 10. A three-dimensional image of how a rectangular eddy changes to a curved shape during times [16].

تصاویر ماهواره‌ای سرعت ادی‌ها خلیج فارس را ۳-۶ سانتی‌متر بر ثانیه (معادل 0.06 m/s - 0.03 m/s) برآورد نمودند که نشان می‌دهد اگرچه انتخاب مساله به صورت فرضی بود، اما در حوضچه‌های عملیاتی مانند خلیج فارس می‌تواند کاربرد داشته باشد.

همچنین نتایج نشان داد که پالس‌های ناشی از موج گرانشی نیز با گذر زمان به صورت یکنواخت در می‌آید و در امتداد حوضه با سرعت کمتر از 0.1 متر بر ثانیه منتشر می‌شوند. باتوجه به نتایج (جدول ۱) و مفروضات مساله، با مقایسه سرعت و انرژی ادی با پهنای متفاوت دیده شد که سرعت ادی با افزایش پهنای (قطر) ادی افزایش می‌یابد که این خود به ادی‌هایی با انرژی بیشتر در قطرهای بزرگتر منجر می‌شود. که با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه انرژی ادی مانند (۲۱) بیان کردند که انرژی ادی با افزایش شعاع ادی افزایش می‌یابد همچنین بیان کردند ادی‌ها بزرگتر با سرعت بیشتری انرژی دارند. مرجع (۲۲) با موضوع ویژگی‌های فیزیکی لایه آمیخته اقیانوسی در خلیج فارس با استفاده از مدل PALM و شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ، انجام شد نتیجه گرفتند که ادی‌های بزرگ دارای انرژی زیادی هستند و همچنین بیان داشتند که جریانهای بزرگتر با سرعت‌های بیشتر، انرژی جنبشی بیشتر دارند. تطابق خوبی نشان می‌دهد. (۲۳)

مشارکت نویسندگان

نویسنده‌ی اول، به عنوان محقق اصلی، اجرای مدل، تهیه‌ی اولیه شکل‌ها، کدنویسی و پیش‌نویس اولیه مقاله را عهده‌دار بودند. نویسنده‌ی دوم به عنوان استاد راهنما، مسئولیت هدایت تحقیق و کدنویسی، هدایت بحث و نتیجه‌گیری و نسخه‌نهایی مقاله را بر عهده داشتند.

تشکر و قدردانی

مقاله ارسالی حاصل پایان‌نامه مقطع ارشد رشته فیزیک‌درا در دانشگاه هرمزگان است که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۹/۲۳ در شورای تحصیلات تکمیلی دانشگاه هرمزگان به ثبت رسیده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از دانشگاه هرمزگان جهت فراهم آوردن شرایط پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

با تغییر مکانی جریان در سمت راست و چپ حلقه ادی زمینگردی نسبت به مرکز آن، تاوایی ایجاد می‌شود که چرخش را برای ادی متعادل زمینگردی ایجاد می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، معادلات زمینگردی براساس راهنمای کوریولیس مربوط به موسسه اقیانوسی Woods Hole (نسخه ۸)، در عرض جغرافیایی $28^{\circ}N$ ، در آب جنوبی کشورمان، خلیج فارس به مدت ده روز حل شد. نتایج حاصل از اجرا کد جریان زمینگرد که با توجه به تقریب زمینگرد بودن جریان شکل ادی حاصل بصورت متقارن و گاوسی دارد، به خوبی معکوس شدن جریان در سمت راست و چپ حلقه ادی زمینگردی را نشان می‌دهد که به علت تغییر مقدار سرعت در راستای مکان، تاوایی و در نتیجه چرخش ادی را منجر می‌شود. از آنجایی که شبیه‌سازی از حالت قله‌ای نسبتاً مستطیل در حالت اولیه آغاز شده بود، به تدریج با اعمال معادلات دیفرانسیل زمینگردی (معادلات ۱۱ الی ۱۴)، به صورت یک ادی منحنی شکل یکنواخت در سطح تراز آب شکل می‌گیرد و به خوبی اثرات لبه اولیه ادی، تصحیح می‌شود. چون این مدل تک لایه فقط به محاسبه سیال در داخل حوضه فرضی می‌پردازد، تنها انرژی موجود در مدل، در شرایط اولیه مدل، همان ادی مربع شکلی است که در مرکز حوضه قرار دارد. با توجه به شرایط مرزی اعمال شده به مدل، امواج می‌توانند منحصراً فقط به خارج از مدل در جهت x حرکت کنند و هیچ موج و جریانی نمی‌تواند از خارج حوضه به داخل آن وارد شود و این به معنای تحمیل یک فرایند انتقال یک بعدی بر حوضه مدل در راستای قطر ادی است. با توجه به این شرایط، اگر چه در ابتدای شبیه‌سازی، ناپایداری‌هایی در سطح آب و سرعت جریان در اطراف حلقه اصلی زمینگردی دیده می‌شود، اما به تدریج با گذر زمان، مدل به صورت پایدار و یکنواخت درمی‌آید.

به علاوه، همان طور که دیده شد، ادی شبیه‌سازی شده مربوط به حوضه فرضی بود، اما در متن مقاله تا حد امکان، سعی شد که ادی شبیه‌سازی شده با ادی‌های موجود در خلیج فارس از نظر اندازه مطابقت داشته باشد. و شکل گاوسی و متقارن ادی با مطالعه (۱۲) تطابق دارد. طول ادی برابر با 50 km (طبق مطالعه (۱) و (۸)) شد و سرعت ادی زمینگردی برابر با 0.029 m/s به دست آمد. با تحقیقات انجام شده در این زمینه مانند (۲۰) که محاسبه جریان زمینگرد در خلیج فارس را مورد بررسی قرار دادند، سرعت این نوع ادی را در منطقه در عرض 28 درجه، حدود 0.028 متر بر ثانیه برآورد نمودند. همچنین مرجع (۸)، با استفاده از

References

1. Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. *J Cons Int Explor Mer.* 1980;39:175-192. doi: 10.1093/icesjms/39.2.175
2. Zarei P, Siddiq Z, Marvasti SS, Torabi Azad M. Study of mid-scale ivy of the Persian Gulf using satellite imagery, 13th Iranian Geophysical Conference, Tehran (Persian)2008.

3. Chelton DB, Schlax MG, Samelson RM. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress Oceanograph.* 2011;**91**(2):167- 216. doi: [10.1016/j.pocean.2011.01.002](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002)
4. Webb P. Introduction to oceanography, Creative Commons Attribution 4.0, Unreported License, Roger Williams University 2019.
5. Hallberg R. Using a resolution function to regulate parameterizations of oceanic mesoscale eddy effects. *Ocean Modell.* 2013;**72**:92-103. doi: [10.1016/j.ocemod.2013.08.007](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.08.007)
6. Fallahi M, Sadriensab M. Calculation of Geostrophic Flow in the North Atlantic Ocean (Persian). *J Hydroph.* 2017;**3**(1):11-19.
7. Stewart RH. Introduction to physical oceanography, Texas A and M University College Station 2008.
8. Sadri Nasab M. Three Dimensional Numerical Modeling of Circulation in the Strait of Hormuz. (Persian). *J Oceanograph.* 2010;**1**(1):19-24.
9. Torabi Azad M, Sabetahd Jahromi A, Raisikomiz A. Investigation of quantitative and qualitative changes of geostrophic current in the Persian Gulf. 14th Iranian Geophysical Conference, Tehran, Iranian Geopolitical Association (Persian) 2010.
10. Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *J Physic Oceanograph.* 2010;**40**(9):2122-2134. doi: [10.1175/2010JPO4227.1](https://doi.org/10.1175/2010JPO4227.1)
11. Yao F, Johns WE. A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation. *J Geophysic Res Ocean.* 2010;**115**(C11):17. doi: [10.1029/2009JC005781](https://doi.org/10.1029/2009JC005781)
12. Hosseinibalam F, Hassanzadeh S, Rezaei Latifi A. Three-dimensional numerical modeling of thermohaline and wind-driven circulations in the Persian Gulf. *Appl Mathemat Modell.* 2011;**35**(12):5884-5902. doi: [10.1016/j.apm.2011.05.040](https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.05.040)
13. Raeisi A, Bidokhti A, Nazemosadat SMJ, Lari K. Mesoscale eddies and their dispersive environmental impacts in the Persian Gulf. *Chinese Physic B.* 2020;**29**(8):084701. doi: [10.1088/1674-1056/ab96a3](https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab96a3)
14. Bahmanzadegan Jahromi A, Ezam M, Lari K, Ali Akbari Bidohti A. Numerical study of current and circulation pattern in Chabahar Gulf by FVCOM model. (Persian). *J Oceanograph.* 2021;**12**(45):41-51.
15. Pedlosky J. Geophysical fluid dynamics (Vol. 710). (2nd ed). New York: springer 1987. 724 p.
16. Price JF. A Coriolis tutorial, Part 1: the Coriolis force, inertial and geostrophic motion", Woods Hole Oceanographic Institution, 8 Version 8 October. 2018a;**15**:1-68.
17. Price JF. A Coriolis tutorial, a Coriolis tutorial, Part2: a rotating shallow water model, potential vorticity balance and geostrophic adjustment", Woods Hole Oceanographic Institute, Version 8 October 152018b. 1-65 p.
18. Price JF. A Coriolis tutorial, Part 3: b-effects; westward propagation, Woods Hole Oceanographic Institution, 8 Version 8 October 152018c. 1-50 p.
19. Price JF. A Coriolis tutorial, Part 4: wind-driven circulation and the Sverdrup relation", Woods Hole Oceanographic Institution, Version 5.4 May 62019d. 1-79 p.
20. Rahnmania A, Ali Akbari Beidakhti A, Azam M, Lari K, Sarmad Q. Numerical study of front variability between inlet and outlet waters in the Persian Gulf, Proceedings of the 18th Iranian Geophysical Conference (Persian) 2018. 528-531 p.
21. Sabetahad Jahromi A, Lari K, Soltanianfard MJ, Raisikomiz A. Study of the effect of mesoscale eddies on the distribution of temperature and salinity gradients in the Persian Gulf and the Strait of Hormuz, 13th National Conference of Marine Industries of Iran, Kish Island (Persian) 2011. 1-9 p.
22. Zhan P, Krokos G, Guo D, Hoteit I. Three-dimensional signature of the Red Sea eddies and eddy-induced transport. *Geophysic Res Letter.* 2019;**46**(4):2167-2177. doi: [10.1029/2018GL081387](https://doi.org/10.1029/2018GL081387)
23. Mohammadi F, Hassanzadeh A, Farman Ara M. Physical properties of the mixed oceanic layer in the Persian Gulf using the PALM model and large Eddy simulation. LES. *Two Quarter J Hydrophysic.* 2015:14.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



سمیه درس‌خوان دبیر آموزش و پرورش بندر خمیر استان هرمزگان و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فیزیک دریا از دانشگاه هرمزگان است. ایشان با نرم‌افزارهای MATLAB آشنایی دارد و مقالاتی در کنفرانس‌های علمی ارائه داده است.



مریم سیوف جهرمی استادیار فیزیک دریای دانشگاه هرمزگان است که در زمینه مدل‌سازی، کار با تصاویر ماهواره‌ای و کدنویسی در محیط MATLAB، مهارت دارد و پیش از این با مدل‌های تخصصی مانند ELCOM، COHERENS، FVCOM و MIKE پژوهشهایی انجام داده است.

Soyuf Jahromi, M. Assistant Professor, Physical oceanography, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

✉ soyuffahromi@yahoo.com.au

<https://orcid.org/0000-0002-7877-6277> (Orcid register link)

Somaieh Darskhan, Department of Nonliving Resources of Atmosphere and Ocean, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

✉ somaiefdarskhan@gmail.com

این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:



Citation (Vancouver): Darskhan S, Soyuf Jahromi M, Numerical Solution of the Geostrophic Mesoscale Eddy in the Shallow Water Model. J Oceanography. 2022; 13(49): 81-91.

<http://doi.org/10.52547/joc.13.49.81>

<https://orcid.org/0000-0002-7877-6277>

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.