

بررسی تجربی جدایش جریان چگال از مانع در یک شاره چرخان

جواد باباگلی^۱ متی کلایی^۱ و عباسعلی علی اکبری بیدختی^۲

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فیزیک دریا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، javadbabagoli@ut.ac.ir

استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، bidokhti@ut.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر به مطالعه رفتار جریان چگالی در هنگام حرکت و در نزدیکی یک مانع در محیط آزمایشگاه می‌پردازد. به منظور شبیه سازی از یک مخزن که دو حوزه آن از هم جدا شده و یک مانع که در یک از حوزه‌ها تعبیه شده استفاده شده است. آزمایش‌ها تحت گرانش کاهش یافته و اثرات چرخش مختلف در آزمایشگاه دینامیک شاره‌ها انجام شده است. آزمایش‌ها تحت عدد ریچاردسون بزرگ تراز ۱.۵ و تحت عدد راسبی کوچک‌تر از یک انجام شده است. به کمک روابط و مشاهدات رابطه تجربی بین عدد ریچاردسون و عدد راسبی جریان به دست آمده است که نشان می‌دهد هرچقدر عدد راسبی بزرگ‌تر شود عدد ریچاردسون کوچک‌تر می‌شود (رابطه نمایی). جریان هنگام حرکت در مجاورت مانع و هنگام جدایش از آن رفتارهای مختلفی را نشان می‌دهد، به طوریکه که تحت عدد راسبی ۰.۱۶ و عدد ریچاردسون حدود ۶، دو ادی کامل به شعاع حدود ۴ تا ۵ سانتی‌متر تشکیل می‌شود. ادی‌هایی که در سمت چپ مانع تشکیل می‌شود در جهت ساعت‌گرد و در سمت راست مانع به صورت پادساعت‌گرد تشکیل می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که هرچقدر فرکانس چرخش میز چرخان بیشتر می‌شود به جای دو ادی بزرگ، پیچک‌های کوچک به ابعاد ۰.۵ تا ۱ سانتی‌متر تشکیل شده و حرکت شاره ناپایدار می‌شود. واژه‌های کلیدی: جریان چگالی، مانع، شاره چرخان، شرایط فیزیکی مختلف، جدایش جریان.

Separation of dense flow from the cape in a rotating fluid

Javad Babagoli¹, Abbas Ali Akbbari Bidokhti²

¹Graduate in Physical Oceanography, Institute of Geophysics, javadbabagoli@ut.ac.ir

²Professor, Institute of Geophysics, bidokhti@ut.ac.ir

Abstract

The current study investigates behavior of the dense flow near a model cape in the laboratory. To do the simulations, we used a rotating tank with two basins and a cape in one basin. The research was conducted under different reduced gravity and various Coriolis parameters in the Geophysical Fluid Dynamics (GFD) laboratory. Most of the experiments were carried out under the condition of $Ri > 1.5$ and $R < 1$. Using laboratory observations, we obtained a mathematical relation between Ri (Richardson Number) and R (Rossby number). The current shows different behavior when separating from the cape, based on different laboratory conditions. With $R=0.16$ and $Ri=6$, cape eddies are formed by dense flow which are 4-5 cm across, of order of the cape size. Under higher rotational frequency, the current becomes unstable and many smaller (0.5-1 cm) are formed.

Keywords: Density driven flow, cape, rotating fluid, laboratory experiments, separation.

۱ مقدمه

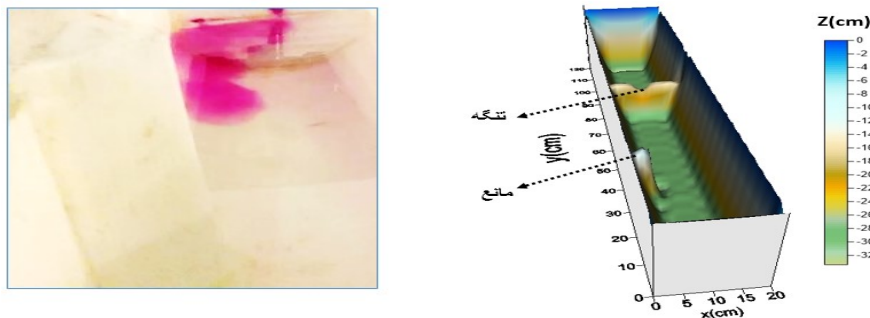
جریانهای چگال نقش مهمی در اقیانوس‌ها بازی می‌کنند و مطالعه آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های مطالعه چنین جریاناتی بررسی آن‌ها در محیط آزمایشگاهی است که با کنترل کردن هر متغیر و دوری از پیچیدگی‌های موجود در طبیعت از جایگاه ویژه‌ای نزد دانشمندان برخوردار است. در این بین پژوهشگران مختلف نگاه‌های خود را به مطالعه چنین جریان‌هایی در هنگام گذر از سطح شیب‌دار و مانع معطوف کردند. بررسی جریان چگال در مجاورت یک مانع در محیط غیر چرخان توسط فرمانیوک و گاوریلو (۲۰۰۵)، مطالعه تلاطم جریان چگال روی میز چرخان (Rossato and Elsa Alves, 2011; Shapiro and Zatsepin, 1996)، مطالعه جریان گرانی در روی سطح شیب‌دار روی میز چرخان (Manucharyan et al, 2014)، شکل‌گیری ادی در روی سطح شیب‌دار)

(LANE-SERFF and BAINES, 1997) و بررسی پایداری جریان چگال در روی سطح شیب‌دار توسط سادرلند و همکاران (۲۰۱۴) تنها بخشی از این پژوهش‌ها هستند.

پژوهش حاضر به مطالعه رفتار جریان گرانی هنگام به دام افتادن و در مجاورت یک مانع دماغه‌ای می‌پردازد. این پژوهش در آزمایشگاه دینامیک شاره‌ها موسسه ژئوفیزیک انجام و برای نیل به این هدف، آزمایش‌ها مختلفی تحت شرایط فیزیکی متنوع برای درک رفتارهای جریان چگال انجام شده است.

۲ روش تحقیق

مخزن آزمایش به طول ۱.۲ متر و عرض ۰.۲ متر و ارتفاع ۰.۳ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱) که در آن مخزن با دو بخش از هم جدا شده است. برای مطالعه جریان گرانی در مجاورت یک جسم از یک مانع (cape) با شیب حدود ۳۰ درجه استفاده شده است. این آزمایش‌ها تحت شرایط جریانی با گرانش کاهش یافته، روی میز چرخان با دور چرخش، حجم آب ورودی مختلف و نیز در دو عمق در کف مخزن (در مدل دولایه) و در وسط مخزن (مدل سه لایه) انجام شد. ابتدا مخزن را با آب معمولی پر کرده و به آرامی آب شور از بالا به آن تزریق شد تا در محیط مخزن چین‌بندی چگالی شود. سپس آب شور با چگالی مشخص (ترکیب شده با محلول پرمنگنات) را برای ایجاد جریان گرانی، از بالای سطح شیب‌دار تزریق شده است. برای رصد هر چه بهتر جریان در هنگام به دام افتادن (به دلیل اثر کوریولیس) و رفتار آن در مجاورت مانع از یک دوربین با دقت ۰.۰۱ سانتی‌متر استفاده شده است. دوربین عمود بر مخزن و در ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری مخزن نصب شده و با سرعت نسبی صفر نسبت به میز چرخان حرکت می‌کند.



شکل ۱. مخزن استفاده شده در آزمایش با اندازه طول، عرض و ارتفاع و محل تنگه‌ها و مانع را نشان می‌دهد (سمت راست)، و جریان گرانی تزریق شده و پس از عبور از تنگه در حال نزدیک شدن به مانع است (سمت چپ).

جریان هنگامی که از تنگه عبور می‌کند در حوزه دوم (همان حوزه‌ای که مانع است) به دام می‌افتد. در هنگام به دام افتادن دو نیرو گرادیان فشار (ناشی از اختلاف چگالی) و کوریولیس بر جریان اثر می‌گذارند (با توجه به شرایط آزمایش اثرات اصطکاک ناچیز است به‌ویژه در مدل سه لایه)، ولی هنگامی که به مانع می‌رسد و در هنگام جدا شدن دیگر جریان به دام افتاده نیست و رفتار جالبی از خود نشان می‌دهد. برای محاسبه پارامترهای مربوط به جریان از روابط ۱ استفاده شده است (Bains, 1997; Gill, 1982; Lane-serff and

$$R_D = \frac{\sqrt{g' H}}{f} \quad (1)$$

$$Q \approx \frac{1}{2} HLU$$

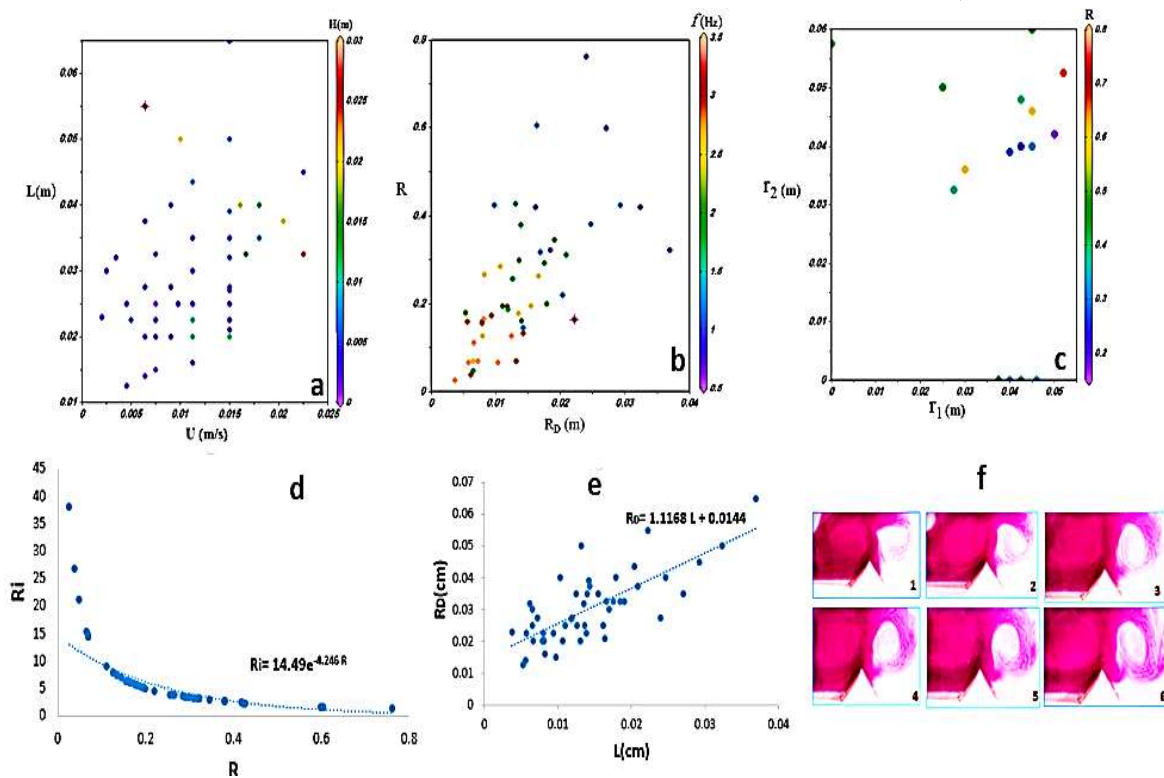
$$R = \frac{U}{fL}$$

$$Ri = \frac{g' H}{U^2}$$

در این روابط R_D شعاع تغییر شکل راسبی، Q میزان حجم آب ورودی، Ri عدد ریچاردسون، R عدد راسبی، U سرعت، f دو برابر سرعت زاویه ای میز چرخان) پارامتر کوریولیس، L پهنای جریان، g' گرانی کاهش یافته و H ارتفاع جریان است. در آزمایش‌ها گرانش کاهش یافته به سه مقدار ۰.۲۳، ۰.۰۷ و ۰.۱۸ متر بر مجذور ثانیه (در پژوهش لسنرف و همکاران ۰.۴۹، وایتد و سندس ۰.۲ متر مجذور ثانیه استفاده شده است) و پارامتر کوریولیس به‌طور متغیر در این آزمایش از حدود ۰.۷ تا ۳.۵ بر ثانیه استفاده شده است (سادلند ۱.۵ تا ۲ بر ثانیه، لسنرف و همکاران حدود ۰.۶ تا ۴.۲ بر ثانیه در نظر گرفتند).

۳ نتایج

با توجه به شرایط فیزیکی مختلف، سرعت و پهنای جریان به کمک تحلیل تصاویر دوربین به دست آمده و به کمک روابط ۱ پارامترهای مؤثر دیگر مربوط به جریان محاسبه شده است (شکل ۲، a و b). مهم‌ترین نتیجه‌ای که گرفته شده است این است که جریانی که در بستر در حال حرکت است (مدل دولایه) از مانع جدا نشده و به مانع چسبیده و در واقع مانع را دور می‌زند یعنی جریان هنگامی که در کف حرکت می‌کند رفتار تقریباً مشابه‌ای را در شرایط مختلف فیزیکی نشان می‌دهد. از این رو بیشتر تحلیل‌ها مربوط به مدل سه لایه‌ای است که آب با چگالی زیاد در کف و آب شیرین در نزدیک سطح و جریان چگال از وسط آن عبور می‌کند. با توجه به نمودارها، بیشتر آزمایش‌ها تحت عدد راسبی کوچک‌تر از ۱ (عمدتاً ۰.۱ تا ۰.۳) و عدد ریچاردسون بزرگ‌تر از ۱ (عمدتاً ۱.۵ تا ۷) انجام شده است که دو نکته فیزیکی را یادآور می‌شود، به طوریکه اثرات چرخش برای جریان مهم ولی اثرات درون آمیختگی (entrainment) مهم نیست. پهنای جریان با شعاع تغییر شکل راسبی که به کمک روابط ۱ محاسبه شده است مقایسه شد و یک رابطه تجربی خطی برای آن به دست آمده است (شکل ۲، e). به همین ترتیب رابطه‌ای بین عدد ریچاردسون و عدد راسبی به صورت نمایی به دست آمده است (شکل ۲، d) که در آن افزایش عدد راسبی جریان با کاهش عدد ریچاردسون همراه است.



شکل ۲: (a) تغییرات پهنای جریان بر حسب سرعت (b) تغییرات عدد راسبی بر حسب شعاع تغییر شکل (c) شعاع ادی‌های تشکیل شده بر اساس عدد راسبی، I_1 و I_2 به ترتیب مربوط به شعاع ادی‌های تشکیل شده سمت چپ و راست مانع هست. (d) منحنی تغییرات عدد ریچاردسون بر حسب عدد راسبی (e) منحنی تغییرات شعاع تغییر شکل راسبی بر اساس پهنای جریان. (f) ادی‌های تشکیل شده تحت گرانی کاهش یافته ۰.۰۷، عدد راسبی ۰.۱۶، عدد ریچاردسون ۶ (تصاویر به فاصله هر ۲ ثانیه است).

جریان هنگامی که از مانع جدا می‌شود رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در گرانی کاهش یافته ۰.۲۳ (متر بر مجذور ثانیه) مشاهده می‌شود که جریان تحت پارامتر کوریولیس $1.71 s^{-1}$ ، ادی ۱ (یا پیچک، سمت چپ مانع) تشکیل می‌شود ولی ادی ۲ (سمت راست مانع) تشکیل نمی‌شود و هنگامی که پارامتر کوریولیس به $1.2 s^{-1}$ می‌رسد ابتدا ادی ۲ تشکیل شده و سپس ادی ۱ تشکیل می‌شود. هنگامی که پارامتر کوریولیس بیشتر از $2 s^{-1}$ می‌شود جریان ناپایدار شده و پیچک‌هایی در شعاع ۰.۵ تا ۱ سانتی‌متر تشکیل شده که تعداد آن‌ها به ۵ تا ۸ عدد هم می‌رسد. بهترین حالتی که دو ادی کامل تشکیل شده است در گرانی کاهش یافته ۰.۰۷ (متر بر مجذور ثانیه)، عدد راسبی ۰.۱۶ و عدد ریچاردسون ۶، است که دو ادی به شعاع‌های ۵ و

۴.۵ سانتی‌متر تشکیل شده است. مکانیزم شکل‌گیری به این صورت است که ادی اول در مقیاس زمانی حدود ۸۰ ثانیه (پس از رسیدن به مانع) به صورت پادساعت‌گرد (در جهت چرخش میز چرخان) ولی ادی ۲ در حدود ۲۰۰ ثانیه پس از رسیدن به مانع توسعه و به صورت ساعت‌گرد (در خلاف جهت چرخش میز چرخان) شکل می‌گیرد (شکل ۲، f).

۳ بحث و نتیجه‌گیری

بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که جریانی که در کف حرکت می‌کند به دلیل شرایط مرزی و اثرات اصطکاک، مانع را دور زده و رفتار شبه ادی (پیچگی) از خود در شرایط فیزیکی مختلف نشان می‌دهد و ادی تشکیل نمی‌شود. از این رو بیشتر تحلیل‌ها مربوط به جریان گرانی است که روی سطح همچگال دور از کف حرکت می‌کند و هم عمق خود را پس از گذر از سطح شیب‌دار پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که جریان گرانی در آزمایش‌ها این پژوهش دارای عدد راسبی کوچک‌تر از یک و شعاع تغییر شکل راسبی از ۰.۵ تا ۴ سانتی‌متر و عدد ریچاردسون ۱.۵ تا ۴۰ است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که پهنای جریان که از طریق مشاهدات مستقیم به دست آمده و شعاع تغییر شکل راسبی که از راه تئوری (روابط ۱) به دست آمده است، به صورت خطی به هم مربوط می‌شوند. بین عدد ریچاردسون و عدد راسبی یک رابطه نمایی وجود دارد که هرچقدر عدد راسبی بزرگ‌تر شود، عدد ریچاردسون کوچک‌تر می‌شود. جریان هنگامی که به مانع می‌رسد و هنگامی که از آن جدا می‌شود رفتارهای مختلفی از خود نشان می‌دهد که در عدد راسبی ۰.۱۶ و عدد ریچاردسون ۶ دو ادی کامل تشکیل می‌شود. ادی ۱ طوری رشد پیدا می‌کند که در مرکز آن آب شور ولی ادی ۲ طوری رشد پیدا می‌کند که در مرکز آن آب شیرین است و بیشتر ادی‌های تشکیل‌شده دارای ابعادی ۴ تا ۵ سانتی‌متر می‌باشند. با افزایش فرکانس چرخش، جریان هنگام جدا شدن از مانع ناپایدار شده و پیچک‌هایی با ابعاد کوچک‌تر تشکیل می‌شوند. اگرچه بنا بر آنچه گفته شد مؤلفین با نگاه GFD به مطالعه آزمایشگاهی جریان پرداخته ولی حقیقت چیز دیگری است. چنین جریان‌هایی در دریا‌های ایران بسیار حائز اهمیت هستند و ایده اصلی شکل‌گیری این پژوهش را در پدیده‌ی کاملاً واقعی در دریای خزر و خلیج فارس باید جستجو کرد. در دریای خزر، در جریان گرانی به دام افتاده هنگام رسیدن به دلتای سفیدرود (باباگلی، ۱۳۹۵) چنین اتفاقی برای آن می‌افتد و در خلیج عمان در نزدیکی رأس الحمرا (Ezam et al, 2010) رفتاری مشابه از خود نشان می‌دهد که مؤلفین سعی داشتند با تغییر دادن پارامترهای فیزیکی شرایط واقعی هر دو پدیده را در آزمایشگاه شبیه‌سازی کنند.

۴ منابع

بابا گلی، ج.، ۱۳۹۵، بررسی جریان آب عمیق از حوزه خزر میانی به حوزه خیزر جنوبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- Cenedese, C., Whitehead, J. A., Ascarelli, T. A., & Ohiwa, M. (2004). A dense current flowing down a sloping bottom in a rotating fluid. *Journal of Physical Oceanography*, 34(1), 188-203.
- Ermanyuk, E. V., & Gavrilov, N. V. (2005). Interaction of internal gravity current with an obstacle on the channel bottom. *Journal of applied mechanics and technical physics*, 46(4), 489-495.
- Ezam, M., Bidokhti, A. A., and Javid, A. H. (2009). Numerical simulations of spreading of the Persian Gulf outflow into the Oman Sea. *Ocean Science Discussions*, 6(4).
- Gill, A. E. (1982). "Atmosphere – Ocean dynamics". Academic Press, New York, 662 pp.
- Lane-Serff, G. F., & Baines, P. G. (1998). Eddy formation by dense flows on slopes in a rotating fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 363, 229-252.
- Manucharyan, G. E., Moon, W., Sévellec, F., Wells, A. J., Zhong, J. Q., & Wettlaufer, J. S. (2014). Steady turbulent density currents on a slope in a rotating fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 746, 405-436.
- Rossato, R., & Alves, E. (2011). Experimental study of turbidity currents flow around obstacles. In *Proc. 7th Int. Symp. Stratified Flows*, A. Cenedese, S. Espa, R. Purini, eds. Università La Sapienza, Rome, Italy.
- Shapiro, G. I., & Zatsepin, A. G. (1997, March). Gravity current down a steeply inclined slope in a rotating fluid. In *Annals Geophysicae* (Vol. 15, No. 3, pp. 366-374). Springer-Verlag.
- Sutherland, B. R., Nault, J., Yewchuk, K., & Swaters, G. E. (2004). Rotating dense currents on a slope. Part 1. Stability. *Journal of Fluid Mechanics*, 508, 241-264.