

029.



1979

۸۴/۱/۱۰۸۹۹۶
۸۸۰۶۱



دانشکده علوم دریایی
گروه فیزیک دریا
پایان نامه کارشناسی ارشد

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

نگارش

ابوذر قاسمی و رنامخواستی

اساتید راهنما

دکتر سرمد قادر و دکتر محمدرضا بنازاده ماهانی

استاد مشاور

مهندس داریوش منصوری

مستند
اطلاعات در کتابخانه
تربیت مدرس

۱۳۸۸ / ۱۱ / ۱۸

بهمن ۱۳۸۷

۱۰۹۸۸۹



تاریخ:.....

پیوست:.....

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس مبین بخشی از فعالیت‌های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده (۱) در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) های خود، مراتب را قبلاً به مرکز نشر دانشگاه اطلاع دهد.

ماده (۲) در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

((کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته فیزیک دریا است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده علوم دریایی به راهنمایی اساتید محترم دکتر سرمد قادر و دکتر محمدرضا بنازاده ماهانی و مشاوره استاد محترم آقای مهندس داریوش منصوری از آن دفاع شده است.))

ماده (۳) به منظور جبران بخشی از هزینه های نشریات دانشگاه تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به مرکز نشر دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده (۴) در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه نماید.

ماده (۵) دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند، به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده (۶) اینجانب ابوذر قاسمی و رنامخواستی دانشجوی رشته فیزیک دریا در مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: ابوذر قاسمی و رنامخواستی

تاریخ و امضاء:
۸۷/۱۲/۱۱

دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسان‌ها که لازمه شکوفائی علمی و عملی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشکده و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها، رساله‌های مصوب دانشگاه، متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

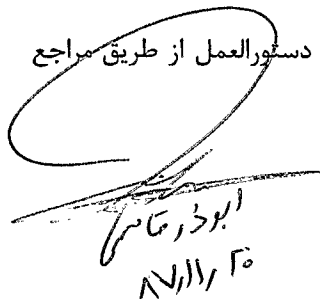
ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه و رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه یا رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه یا رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه و یا رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵ - این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.


ابولموس رمانی
۲۵ اردیبهشت ۸۷

تقدیم به

آرامبخش ترین و امن ترین آغوش دنیا
لطافت بهاران و شکوه صبر و ایمان

پدر و مادرم

و

خواهران و برادران عزیزم

تأییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیئت داوران نسخه نهائی پایان نامه آقای ابوذر قاسمی

تحت عنوان: شبیه سازی عددی جریان گرانی کف آقیانوس بر روی سطح شیب دار با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم

را از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد پیشنهاد می کنند.

اعضای هیأت داوران نام و نام خانوادگی رتبه علمی امضا



استادیار

دکتر سرمد قادر

۱- استاد راهنما



استادیار

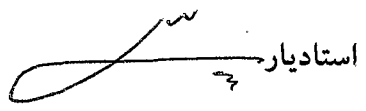
دکتر محمد رضا بنزاده

۲- استاد راهنمای دوم

مربی

مهندس داریوش منصوری

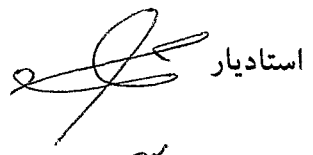
۳- استاد مشاور



استادیار

دکتر سید علی آرمسا

۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی



استادیار

دکتر خسرو اشرفی

۵- استاد ناظر



استادیار

دکتر سید علی آرمسا

۶- استاد ناظر

مشکر و قدردانی

خداوند متعال را شاکرم که با الطاف و عنایات بی پایان خویش تحمل سختی ها و مرارت ها را در مسیر تحقیق برایم آسان ساخت و امید به موفقیت را در من زنده نگه داشت و انجام این تحقیق را ممکن ساخت.

در مسیر این تحقیق از راهنمایی اساتید ارشد و بزرگوار می برخوردار بودم که لازم است صمیمانه از آنان سپاسگزاری کنم. از اساتید محترم جناب آقای دکتر سرمد قادر و دکتر محمد رضا بنازاده مائنی به پاس تمامی محبت ها و ایشان در طول تحصیل در دوره کارشناسی ارشد مشکرمی کنم.

از جناب آقای مهندس داریوش منصوری که از مشاوره های ایشان در مراحل اجرای پایان نامه بهره بردم، مشکرم.

از جناب آقای دکتر خسرو اشرفی که داور بی پایان نامه اینجانب را قبول کردند، مشکرم.

ببخشید از دوستان عزیزم آقایان علی ایمنی تهرانی، احمد رضا ولیپوری، اسلام جاویدان خرد و این اوجی فکر که در تمامی مراحل این تحقیق با من همراه بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان این تحقیق از دیگر عزیزانی که در طول انجام این پایان نامه به عنحو از لطف و بزرگواریشان بهره مند بودم و متاسفانه نام آنها ذکر نشده است، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم و از خداوند متعال به روزی و موفقیت برایشان آرزو مندم.

ابوزقاسمی

بمهر ماه ۸۷

چکیده

جریان‌های گرانی از جمله جریان‌های تأثیرگذار بر محیط پیرامون انسان‌ها می‌باشند. شبیه‌سازی جریان‌های گرانی به خاطر میدان جریان پیچیده آنها از دیر باز تا کنون مورد توجه محققان بسیاری بوده است. در تحقیق حاضر به عنوان گامی دیگر در جهت شناخت بهتر جریان گرانی از روش فشرده مرتبه چهارم که یک روش با توانایی تفکیک بالا می‌باشد برای شبیه‌سازی میدان پیچیده جریان گرانی استفاده شده است. ابتدا برای بررسی عملکرد و دقت روش فشرده مرتبه چهارم نتایج مربوط به حل عددی مسئله اقیانوسی استومل که دارای حل تحلیلی است، ارائه می‌شوند. مقایسه نتایج مسئله استومل برای روش‌های فشرده مرتبه چهارم و روش تفاضل متناهی مرتبه دوم مرکزی نشان می‌دهد که خطای کلی روش فشرده مرتبه چهارم در مقایسه با روش مرتبه دوم مرکزی حداقل تا دو مرتبه دقت کمتر است.

سپس در ادامه، نتایج مربوط به اعمال روش فشرده مرتبه چهارم برای شبیه‌سازی عددی جریان گرانی در قالب شارش لاک اکسچنج¹ و جریان گرانی روی سطح شیب‌دار ارائه خواهد شد. تحول میدان شارش این پدیده بسیار پیچیده می‌باشد و از این رو مسئله‌ای مناسب جهت سنجش توانایی روش‌های عددی برای حل میدان‌های شارش پیچیده اقیانوسی محسوب می‌گردد. در کار حاضر شبیه‌سازی‌ها برای رژیم‌های شارش متفاوت انجام می‌شوند و علاوه جزئیات مربوط به نحوه اعمال شرایط مرزی لغزش آزاد و بدون لغزش نیز که مناسب و همخوان با روش فشرده مرتبه چهارم هستند، ارائه می‌گردند.

¹ Lock exchange

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۱	۱.۱ تعریف جریان گرانی
۶	۲.۱ آناتومی جریان گرانی
۶	۱.۲.۱ نوک جریان گرانی
۸	۲.۲.۱ جبهه جریان گرانی
۸	۳.۲.۱ خیزآب جریان گرانی
۹	۴.۲.۱ ناپایداری کلون-هلمهولتز
۱۱	۲ مروری بر منابع
۱۱	۱.۲ شبیه‌سازی عددی جریان گرانی
۳	۲.۲ هدف از انجام تحقیق حاضر
۵	۳ مواد و روشها
۵	۱.۳ شکل کلی معادلات ناویر استوکس
۶	۲.۳ معادلات حاکم با تقریب بوسینسک
۱۲	۳.۳ گسسته‌سازی زمانی معادلات حاکم
۱۴	۴.۳ گسسته‌سازی مکانی با استفاده از روش تفاضل متناهی مرتبه دوم مرکزی
۱۴	۱.۴.۳ گسسته‌سازی شرایط مرزی
۱۵	۱.۱.۴.۳ شرط مرزی بدون لغزش
۱۷	۲.۱.۴.۳ شرط مرزی لغزش آزاد
۱۷	۳.۱.۴.۳ شرط مرزی باز
۱۸	۴.۱.۴.۳ شرط مرزی عایق
۱۸	۵.۳ گسسته‌سازی مکانی با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم
۲۱	۱.۵.۳ گسسته‌سازی شرایط مرزی
۲۱	۱.۱.۵.۳ شرط مرزی بدون لغزش
۲۲	۲.۱.۵.۳ شرط مرزی باز
۲۳	۳.۱.۵.۳ شرط مرزی عایق
۲۳	۶.۳ گسسته‌سازی عملگر ژاکوبین
۲۴	۷.۳ تشریح نحوه حل عددی معادلات
۲۵	۴ تشریح نتایج حل عددی

۲۵	مسئله اقیانوسی استومل	۱.۴
۲۷	حل تحلیلی معادله خطی استومل	۲.۴
۲۸	مورد اقیانوس بدون چرخش (بدون اثر بتا)	۱.۲.۴
۲۹	مورد اقیانوس با چرخش (با اثر بتا)	۲.۲.۴
۳۰	حل معادله استومل به روش تفاضل متناهی فشرده مرتبه چهارم	۳.۴
۳۳	حل معادله استومل به روش مرتبه دوم مرکزی	۴.۴
۳۳	بررسی دقت روش فشرده مرتبه چهارم	۵.۴
۳۵	شبیه‌سازی عددی جریان گرانی در قالب شارش لاک اکسچنج	۶.۴
	۱.۶.۴ شبیه‌سازی جریان گرانی در قالب شارش لاک اکسچنج با استفاده از روش مرتبه دوم مرکزی	۳۹
۴۸	شبیه‌سازی عددی جریان گرانی مسطح با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم	۲.۶.۴
۴۸	۱.۲.۶.۴ نتایج حاصل از به‌کارگیری شرط مرزی بدون لغزش	۴۸
۵۹	۲.۲.۶.۴ نتایج حاصل از به‌کارگیری شرط مرزی لغزش آزاد	۵۹
۶۴	۳.۶.۴ شبیه‌سازی جریان گرانی استوانه‌ای با استفاده از روش فشرده مرتبه چهارم	۶۴
۶۸	۴.۶.۴ مقایسه نتایج حاصل از روش مرتبه دوم مرکزی و مرتبه چهارم فشرده	۶۸
۶۹	۵.۶.۴ صحت سنجی	۶۹
۷۰	۷.۴ شبیه‌سازی جریان گرانی کف اقیانوس روی سطح شیب‌دار	۷۰
۷۰	۱.۷.۴ شرایط حل عددی	۷۰
۷۲	۲.۷.۴ شبیه‌سازی با استفاده از روش مرتبه چهارم فشرده	۷۲
۷۷	۳.۷.۴ شبیه‌سازی با استفاده از روش مرتبه دوم مرکزی	۷۷
۷۷	۴.۷.۴ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش مرتبه دوم و مرتبه چهارم	۷۷
۸۰	۵ جمع‌بندی و پیشنهادات	۸۰
۸۰	۱.۵ جمع‌بندی	۸۰
۸۱	۲.۵ پیشنهادات	۸۱
۸۲	ضمیمه شماره ۱	۸۲
۸۸	ضمیمه شماره ۲	۸۸
۹۱	ضمیمه شماره ۳	۹۱
۱۰۶	منابع	۱۰۶

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۴: خطای کلی محاسبه شده توسط نرم l_2 برای روش‌های فشرده مرتبه چهارم و روش مرتبه دوم مرکزی و زمان محاسبه CPU (بر حسب میلی ثانیه) در مدل اقیانوسی استومل برای مورد با اثر بتا ($\beta = 10^{-11} m^{-1} s^{-1}$) تعداد نقاط در راستای x و m_g تعداد نقاط در راستای z ۴۲
- جدول ۲-۴: خطای کلی محاسبه شده توسط نرم l_2 برای روش‌های فشرده مرتبه چهارم و روش مرتبه دوم مرکزی و زمان محاسبه CPU (بر حسب میلی ثانیه) در مدل اقیانوسی استومل برای مورد بدون اثر بتا (n_g تعداد نقاط در راستای x و m_g تعداد نقاط در راستای z). ($\beta = 0$) ۴۲
- جدول ۳-۴: پارامترهای آزمایش‌های عددی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار ۸۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: جبهه جریان گرانی هوای سرد در جو که توسط گرد و غبار و شن‌های معلق قابل دیدن شده است (Simpson 1969) ۲.....
- شکل ۱-۲: توسعه جبهه نیم دریا (Simpson 1997) ۳.....
- شکل ۱-۳: مقطع عرضی یک جبهه جدا کننده دو توده آب A و B . (Pingree 1974) ۴.....
- شکل ۱-۴: تشکیل پلوم رودخانه‌ای و کناره شور در خلیج (Simpson 1997) ۴.....
- شکل ۱-۵: جبهه یک جریان گرانی آب شیرین که در بالای آب دریا حرکت می‌کند (تصویر توسط تکنیک اکو سوندینگ گرفته شده است) (Geyer 1983) ۵.....
- شکل ۱-۶: کناره شور در رودخانه فرزر کانادا (توسط تکنیک اکو سوندینگ آشکارسازی شده است) (Geyer 1983) ۵.....
- شکل ۱-۷: جریان گرانی یک شاره آمیخته‌نشده که روی سطح آب پیشروی می‌کند (Simpson 1997) ۶.....
- شکل ۱-۸: پروفیل دهانه جریان گرانی در یک تانک آزمایشگاهی اختلاف دما از مقدار خیلی کوچک در a تا ۳۵ درجه در f تغییر می‌کند (Simpson 1982) ۷.....
- شکل ۱-۹: ناحیه جبهه‌ای جریان گرانی آب شور که در امتداد کف تانک آب شیرین پیشروی می‌کند (Simpson 1969) ۸.....
- شکل ۱-۱۰: خیز آب جریان گرانی (بازگشت شاره به عقب در ناحیه جبهه‌ای) (Simpson 1986) ۹... ۹.....
- شکل ۱-۱۱: نحوه تکامل توده‌های کلوین هلمهولتز در یک صفحه تاوه (ناپایداری برشی توسط اختلاف سرعت در دو شاره بالایی و پایینی تولید شده است) (Simpson 1986) ۹.....
- شکل ۱-۳: دیاگرام دامنه مستطیل شکل ۲۳.....
- شکل ۱-۴: ابعاد حوزه اقیانوسی و سیستم مختصات ۳۴.....
- شکل ۲-۴: تابع جریان به دست آمده از مدل اقیانوسی استومل ($\beta = 0$) ۳۹.....
- شکل ۳-۴: تابع جریان به دست آمده از مدل اقیانوسی استومل ($\beta = 10^{-11} m^{-1} s^{-1}$) ۴۰.....
- شکل ۴-۴: سیر تحولی جریان گرانی مسطح در آزمایشگاه، جریان گرانی در دو شکل الف و ب در فاز ریزشی و در شکل پ در فاز لختی قرار دارد (Huppert and Simpson 1980) ۴۷.....
- شکل ۴-۵: سه تصویر از نوک شارش لاک اکسپنچ با فاصله زمانی $1/4$ ثانیه، که در آن نمایی دوبعدی از خیز آب به وجود آمده توسط ناپایداری نشان داده شده است (Simpson 1969) ۴۸.....

شکل ۴-۶: نمایی کلی از هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی شارش لاک اکسچنج.....۴۹

شکل ۴-۷: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش مرتبه دوم مرکزی در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری مرز بدون لغزش برای مرزهای بالا و پایین، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$۵۲

شکل ۴-۸: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش مرتبه دوم مرکزی در شبکه‌ای با تفکیک 513×65 با به‌کارگیری مرز بدون لغزش برای مرزهای بالا و پایین، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$۵۳

شکل ۴-۹: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش مرتبه دوم مرکزی در شبکه‌ای با تفکیک 257×33 با به‌کارگیری مرز بدون لغزش برای مرزهای بالا و پایین، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$۵۴

شکل ۴-۱۰: تحول زمانی میدان تاوایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش مرتبه دوم مرکزی در شبکه‌ای با تفکیک 257×33 با به‌کارگیری مرز بدون لغزش برای مرزهای بالا و پایین (خط چین نشان دهنده تاوایی منفی و خط ممتد نشان دهنده تاوایی مثبت است)، (الف) $t = 1$ ، (ب) $t = 2$ ، (پ) $t = 3$ ، (ت) $t = 4$ ، (ث) $t = 5$۵۵

شکل ۴-۱۱: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش مرتبه دوم مرکزی در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری مرز لغزشی برای مرزهای بالا و پایین، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$۵۶

شکل ۴-۱۲: تحول زمانی دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی استوانه‌ای توسط روش مرتبه دوم مرکزی در شبکه‌ای با تفکیک 970×97 با به‌کارگیری مرز بدون لغزش برای مرزهای بالا و پایین. شکل (ح) تاوایی در زمان $t = 6$ ، تحول زمانی دما ((الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$ ، (چ) $t = 6$).....۵۷

شکل ۴-۱۳: تحول زمانی دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری رابطه مرتبه سوم برای تاوایی در مرز بدون لغزش، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$۵۹

شکل ۴-۱۴: نمودار طرح کلی یک جریان گرانی در حرکت بر روی سطح اصطکاکی (Simpson (1972).....۶۰

شکل ۴-۱۵: تحول زمانی میدان تاوایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری رابطه مرتبه سوم برای تاوایی در

مرز بدون لغزش (خطوط نقطه‌چین نشان دهنده تاوایی منفی و خط ممتد نشان دهنده تاوایی مثبت)،
(الف) $t = 1$ ، (ب) $t = 2$ ، (پ) $t = 3$ ، (ت) $t = 4$ ، (ث) $t = 5$ ۶۲

شکل ۴-۱۶: تحول زمانی میدان دما و تاوایی در زمان $t = 5$ در شبیه‌سازی جریان گرانی توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری رابطه مرتبه دوم برای مرز بدون لغزش (خطوط نقطه‌چین نشان دهنده تاوایی منفی و خط ممتد نشان دهنده تاوایی مثبت)، تحول زمانی دما (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$ و (چ) تاوایی در زمان $t = 5$ ۶۳

شکل ۴-۱۷: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 257×33 با به‌کارگیری رابطه مرتبه سوم برای مرز بدون لغزش، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$ ۶۵

شکل ۴-۱۸: تحول زمانی میدان تاوایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 257×33 با به‌کارگیری رابطه مرتبه سوم برای مرز بدون لغزش (خطوط نقطه‌چین نشان دهنده تاوایی منفی و خط ممتد نشان دهنده تاوایی مثبت)، (الف) $t = 1$ ، (ب) $t = 2$ ، (پ) $t = 3$ ، (ت) $t = 4$ ، (ث) $t = 5$ ۶۶

شکل ۴-۱۹: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 513×65 با به‌کارگیری رابطه مرتبه سوم برای مرز بدون لغزش، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$ ۶۷

شکل ۴-۲۰: تحول زمانی میدان تاوایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 513×65 با به‌کارگیری رابطه مرتبه سوم برای مرز بدون لغزش (خطوط نقطه‌چین نشان دهنده تاوایی منفی و خط ممتد نشان دهنده تاوایی مثبت)، (الف) $t = 1$ ، (ب) $t = 2$ ، (پ) $t = 3$ ، (ت) $t = 4$ ، (ث) $t = 5$ ۶۸

شکل ۴-۲۱: جریان گرانی نفوذی که در امتداد سطح مشترک چگالی مابین دو شاره پیشروی می‌کند. خط چین‌ها جبهه تولید شده در اثر نفوذ شاره‌ای که چگالی آن میان دو شاره بالا و پایین را نشان می‌دهد (Britter and Simpson 1981) ۷۰

شکل ۴-۲۲: تحول زمانی میدان دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری شرط مرز لغزشی برای مرزهای بالا و پایین، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$ ۷۱

شکل ۴-۲۳: تحول زمانی میدان تاوایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی مسطح توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 769×97 با به‌کارگیری شرط مرز لغزشی برای مرزهای بالا

و پایین (خطوط نقطه‌چین نشان دهنده تاوایی منفی)، (الف) $t = 1$ ، (ب) $t = 2$ ، (پ) $t = 3$ ، (ت) $t = 4$ ، (ث) $t = 5$ ۷۲

شکل ۴-۲۴: نتایج آزمایشگاهی حاصل از به کارگیری نظریه غیر لزج را در امتداد مرز ثابت (Bretter and Simpson 1978)..... ۷۳

شکل ۴-۲۵: تحول زمانی میدان دمای به دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی استوانه‌ای توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 970×97 یا به کارگیری رابطه مرتبه سوم برای تاوایی در مرز بدون لغزش، (الف) $t = 0$ ، (ب) $t = 1$ ، (پ) $t = 2$ ، (ت) $t = 3$ ، (ث) $t = 4$ ، (ج) $t = 5$ ، (چ) $t = 6$ ۷۶

شکل ۴-۲۶: تحول زمانی میدان تاوایی به دست آمده از شبیه‌سازی جریان گرانی استوانه‌ای توسط روش فشرده مرتبه چهارم در شبکه‌ای با تفکیک 970×97 یا به کارگیری رابطه مرتبه سوم برای تاوایی در مرز بدون لغزش (خطوط نقطه‌چین نشان دهنده تاوایی منفی و خط ممتد نشان دهنده تاوایی مثبت)، (الف) $t = 1$ ، (ب) $t = 2$ ، (پ) $t = 3$ ، (ت) $t = 4$ ، (ث) $t = 5$ ، (ج) $t = 6$ ۷۷

شکل ۴-۲۷: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی میدان دما در زمان $t = 4$ ، (الف) روش مرتبه دوم مرکزی، (ب) روش فشرده مرتبه چهارم و (پ) نتیجه ارائه شده توسط ليو و همکاران (۲۰۰۳)..... ۸۰

شکل ۴-۲۸: نمایی از هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی جریان گرانی روی سطح شیب‌دار..... ۸۱

شکل ۴-۲۹: تحول زمانی میدان شوری روی سطح شیب‌دار توسط روش فشرده مرتبه چهارم با اختلاف شوری $\Delta S = 1.5 \text{ psu}$ ، (الف) $t = 0 \text{ h}$ ، (ب) $t = 0.125 \text{ h}$ ، (پ) $t = 1.5 \text{ h}$ ، (ت) $t = 3 \text{ h}$ ، (ث) $t = 4.25 \text{ h}$ ۸۲

شکل ۴-۳۰: تحول زمانی میدان شوری روی سطح شیب‌دار توسط روش فشرده مرتبه چهارم با اختلاف شوری $\Delta S = 0.5 \text{ psu}$ ، (الف) $t = 0 \text{ h}$ ، (ب) $t = 1.5 \text{ h}$ ، (پ) $t = 3 \text{ h}$ ، (ت) $t = 4 \text{ h}$ ، (ث) $t = 5 \text{ h}$ ۸۵

شکل ۴-۳۱: جریان گرانی در آزمایشگاه که به پایین سطح شیب‌دار نزول می‌کند (Monaghan *et al.* 1999)..... ۸۶

شکل ۴-۳۲: تحول زمانی میدان شوری روی سطح شیب‌دار توسط روش مرتبه دوم مرکزی با اختلاف شوری $\Delta S = 1.5 \text{ psu}$ ، (الف) $t = 0 \text{ h}$ ، (ب) $t = 0.125 \text{ h}$ ، (پ) $t = 1.5 \text{ h}$ ، (ت) $t = 3 \text{ h}$ ، (ث) $t = 4.25 \text{ h}$ ۸۹

شکل ضمیمه ۱-۲: تولید تاوایی کژ فشار. سطوح p و ρ ثابت که بر هم منطبق نیستند باعث افزایش

گردش حول منحنی C می‌شوند (Pedlosky 1987)..... ۱۰۰

فصل اول

مقدمه

در این فصل مختصری در مورد جریان‌های گرانی و چگونگی تشکیل آن‌ها توسط عوامل طبیعی و انسان‌ساخته بیان می‌شود. در نهایت برای آشنایی بیشتر با سیر تحولی جریان گرانی توضیحات مختصری در مورد آناتومی جریان گرانی بیان می‌شود.

۱.۱ تعریف جریان گرانی

جریان گرانی^۱ یا جریان دانسیته^۲ یا جریان شناوری^۳، جریان یک شاره^۴ به داخل شاره دیگر توسط اختلاف چگالی مابین این دو شاره تعریف می‌شود. اختلاف در وزن مخصوص دو شاره که نیروی محرکه این جریان را تولید می‌کند، ناشی از اختلاف دما یا اختلاف مواد معلق یا محلول می‌باشد. جریان‌های گرانی عمده‌تاً افقی هستند. این جریان‌ها بسته به چگالی جریان گرانی و محیط پیرامون در مرز بالا یا پایین محیط پیرامون و یا به صورت دخول^۵ در میان دو شاره که چگالی جریان گرانی مابین این دو شاره است، اتفاق می‌افتند. موارد گوناگونی از جریان گرانی در کاربردهای ژئوفیزیکی گزارش شده است. با توجه به نقش مهمی که در مسائل مربوط به ایمنی صنعتی و محیط زیست دارد، سیر تحول دینامیکی آن در علوم مهندسی و پایه به یک موضوع جذاب و مهم تبدیل شده است (Fannelop 1994). به عبارت دیگر چون جریان‌های گرانی در موقعیت‌های طبیعی و انسان‌ساخته^۶ مختلفی شکل می‌گیرند، قرار دادن آنها در چارچوب روابط علمی بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد.

¹ Gravity Current

² Density Current

³ Buoyancy Current

⁴ Fluid

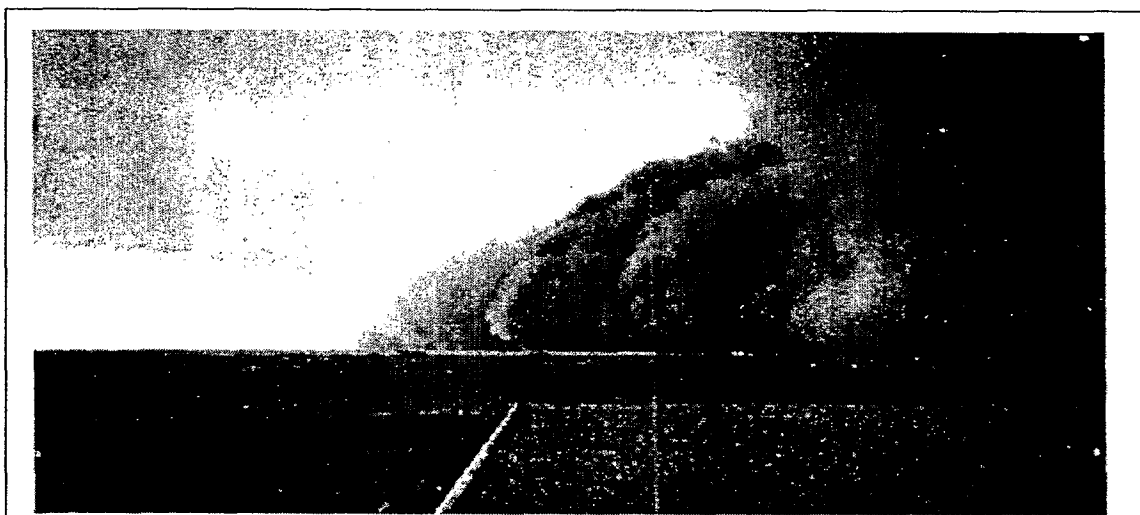
⁵ Intrusion

⁶ Man-Made

برای درک بهتر ضرورت مطالعه هرچه دقیق‌تر جریان‌های گرانی به عنوان یک عامل تأثیر گذار بر محیط پیرامون به نمونه‌هایی از جریان‌های گرانی که عوامل طبیعی و انسان ساخت باعث ایجاد آنها می‌شود، اشاره می‌گردد (Simpson 1982).

در جو اغلب بادهای شدید^۱ که به توفان‌های تندری^۲ وابسته‌اند توسط خروجی توفان تندری به صورت یک جریان گرانی عظیم هوای چگال سرد به وجود می‌آید. شکل ۱-۱ نمونه‌ای از جریان گرانی جوی در سودان را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌کنیم هوای چگال سردی که از سمت راست به سمت چپ در حرکت است توسط شن و گرد و خاکی که از روی زمین توسط بادهای تلاطمی سنگین بلند شده، به خوبی مشخص شده است. ارتفاع این ابر غباری در حدود 1000 m و سرعت پیشروی در حدود 25 m/s است.

در شکل ۱-۲ نحوه توسعه یک نمونه از جبهه نسیم‌دريا نشان داده شده است. جریان گرانی در جبهه نسیم‌دريا^۳، نوع دیگر جریان گرانی در جو می‌باشد. نسیم‌دريا توسط تغییرات روزانه دمای هوای خشکی و دریا در بسیاری از سواحل دنیا رخ می‌دهد. مرز داخل خشکی نسیم‌دريا اغلب یک جبهه سرد کوچک تشکیل می‌دهد. معمولاً این جبهه تا فاصله 200 km به داخل ساحل گسترش می‌یابد که این جریان‌ها در انتشار آلودگی جوی و توزیع حشرات آفت نقش مهمی ایفا می‌کنند.

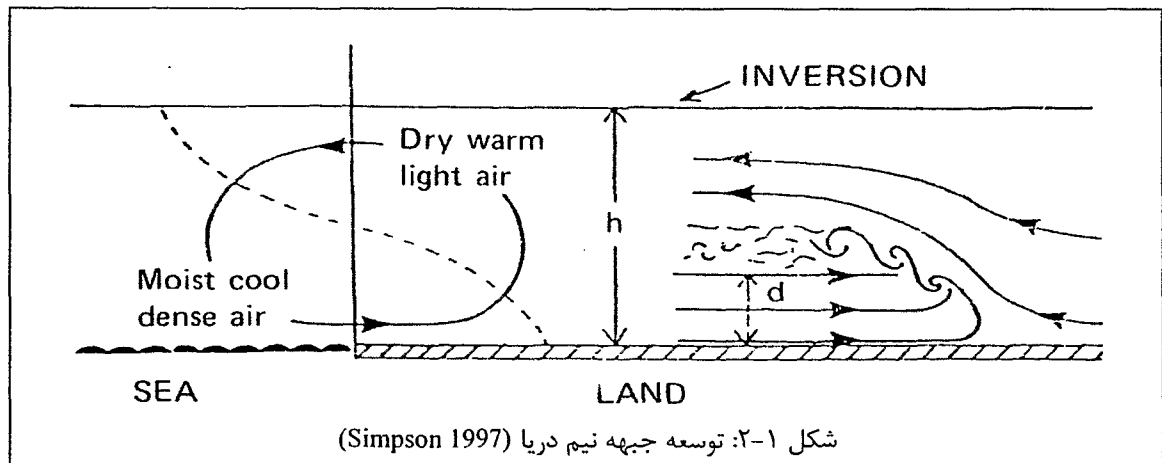


شکل ۱-۱: جبهه جریان گرانی هوای سرد در جو که توسط گرد و غبار و شنهای معلق قابل دیدن شده است (Simpson 1969).

^۱ Sever Squall

^۲ Thunderstorm

^۳ Sea-breeze front



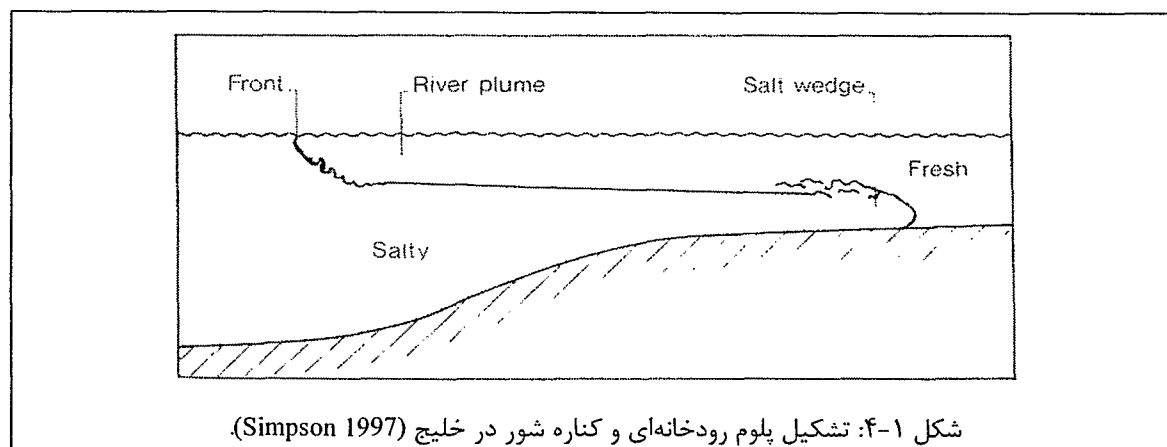
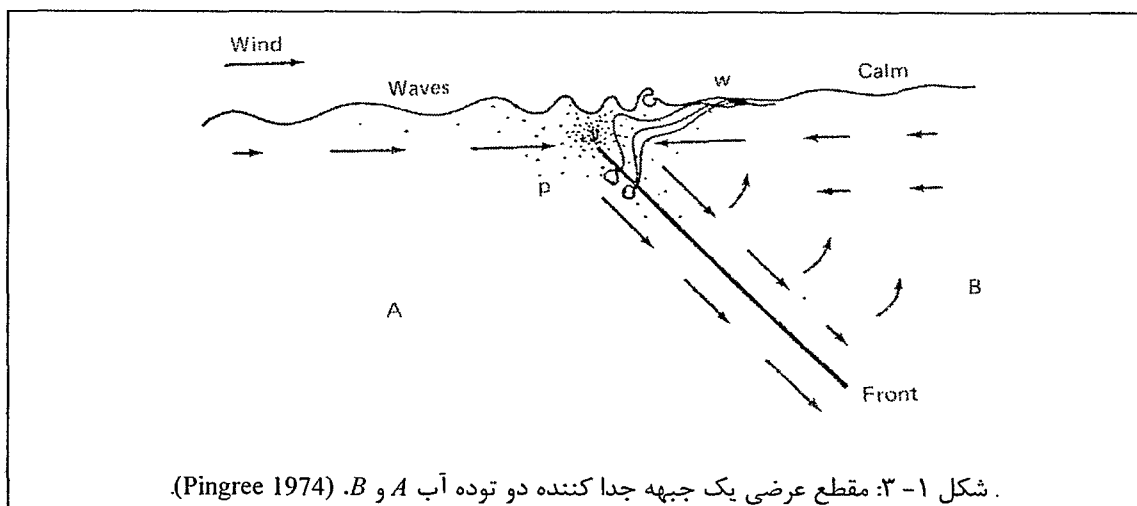
مرزهای معین و مشخصی در اقیانوس مابین دو توده آب مجاور با مشخصات متفاوت شکل می‌گیرد. این مرزها در سطح اقیانوس به صورت خطوط جبهه‌ای جدا کننده آب‌هایی با چگالی متفاوت ظاهر می‌شوند. اختلاف چگالی ناشی از اختلاف در دما، شوری و یا میزان رسوبات معلق می‌باشد. بسیاری از جبهه‌های اقیانوسی با طول عمر چندین ماه در مرزهای دو توده آب با منشاء متفاوت شکل می‌گیرند. این جریان‌های بزرگ مقیاس توسط نیروی تولید شده از چرخش زمین، کنترل می‌شوند. به‌عنوان مثال جبهه گرمایی گلف استریم در مرز گسترش آب‌های گرم دریای سارگاسو به سمت شمال و آب‌های سرد و چگال آتلانتیک شمالی شکل می‌گیرد. گلف استریم (با چگالی کمتر) جریان گرم نزدیک سطح می‌باشد که در امتداد مرز پیشروی می‌کند و قسمتی از این پیشروی ناشی از نیروی کوریولیس و قسمتی ناشی از باد می‌باشد.

همتای کوچک مقیاس جبهه‌های اقیانوسی در آب‌های ساحلی یافت می‌شود که ممکن است نتیجه‌ای از اختلاط^۱ جزر و مدی یا برهمکنش مابین آب شیرین و آب شور باشد. در شکل ۱-۳ ساختار جبهه‌ای نزدیک کانال ایسلند نشان داده شده است. در این شکل دو نوع آب A و B که توسط ناحیه جبهه‌ای از هم جدا شده‌اند، مشاهده می‌گردد. در نزدیک جبهه، حرکت‌ها همگرا می‌شوند و مواد شناور در روی آب (w) در کنار جبهه جمع می‌گردند. شاره با چگالی کمتر (B) از زیر توسط شاره با چگالی بیشتر (A) به طرف بالا رانده می‌شود. هنگامی که جریان از دو طرف به سمت جبهه نزدیک می‌شود هر شیء نزدیک به سطح به سمت این خط حرکت کرده و اجسام شناور در آنجا جمع می‌شوند (Pingree 1974).

در خلیج، ناحیه انتقال مابین رودخانه و آب دریا، رژیم‌های مختلفی از جریان رخ می‌دهد. جزر و مدهایی با سرعت بزرگ در خلیج، باعث به وجود آمدن اختلاط قائم از طریق آشفتگی تولید شده از بستر می‌شود. تخلیه زیاد دبی رودخانه به داخل خلیج اثرات این اختلاط را کاهش داده و باعث ایجاد یک جریان دو لایه می‌شود. شکل ۱-۴ جریان گرانی ایجاد شده در رودخانه با آهنگ برون ریزی بزرگ اما با جریان جزر و مدی کم قدرت را نشان می‌دهد. جریان آب شیرین به سمت خلیج روی

^۱ Mixing

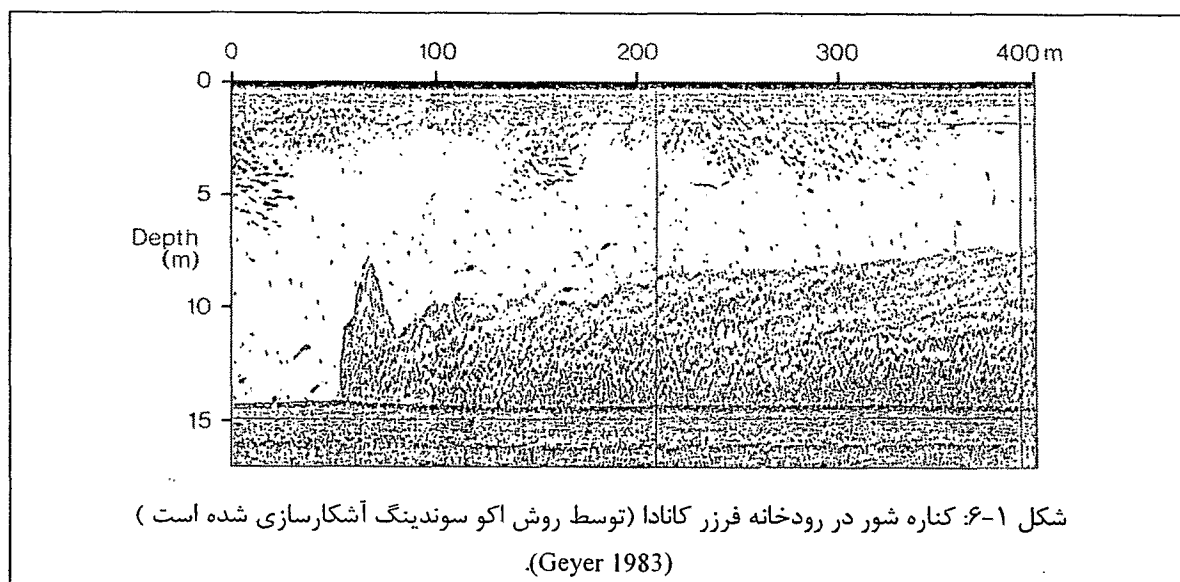
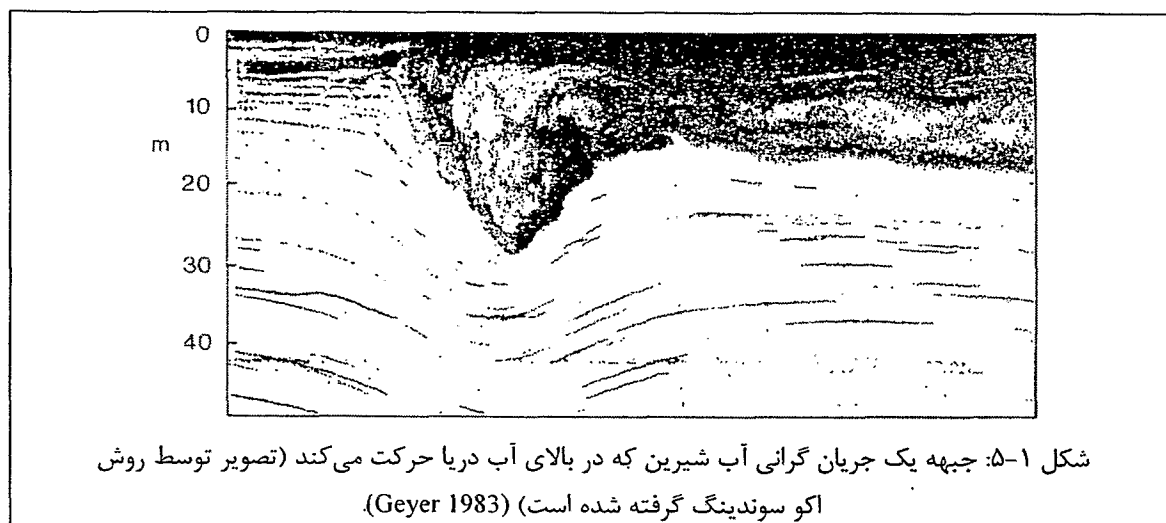
کناره شور^۱ (توسط جریان شور چگال با جهت مخالف تشکیل می‌شود) شکل می‌گیرد و همانطور که در شکل مشاهده می‌شود آب شیرین رودخانه، روی کف رودخانه حرکت نمی‌کند بلکه روی جریان شوری که از سمت خلیج به طرف رودخانه با جهت مخالف می‌آید، پیشروی می‌کند. آب کم چگال که در امتداد سطح روی آب شور خلیج حرکت می‌کند، به صورت یک جریان گرانی است (Simpson 1997).



شکل ۱-۵ جریان سطحی یک پلوم رودخانه‌ای که از رودخانه فرزر^۲ در کانادا به داخل خلیج ریخته می‌شود، را نشان می‌دهد (تصویر با روش اکو سوندینگ^۳ گرفته شده است). در شکل، مقطع عرضی جریان گرانی آب شیرینی که به سمت راست در بالای آب شور خلیج پیشروی می‌کند، مشاهده می‌شود. شکل ۱-۶ ورود کناره شور از خلیج به داخل رودخانه

¹ Salt wedge
² Fraser River
³ Echo-Sounding

فرزر کانادا را نشان می‌دهد، در قسمت جلو جبهه، دهانه جریان گرانی که از دیگر قسمت‌ها برآمده‌تر است، مشاهده می‌گردد (Geyer 1983).



آب دریای شور وقتی که وارد اقیانوس می‌شود روی فلات قاره به سمت اقیانوس سرازیر می‌شود. در این مورد دیگر جریان گرانی روی یک سطح صاف تشکیل نمی‌شود، بلکه روی بستر شیب‌دار فلات قاره به سمت پایین حرکت می‌کند (Simpson 1997). مانند جریان آب شوری که از دریای سرخ وارد اقیانوس اطلس می‌شود یا جریان آب شوری که از خلیج فارس در تنگه هرمز به دریای عمان می‌ریزد. این نوع از جریان گرانی می‌تواند در ریزش جریان گل آلود^۱ رودخانه‌ها به داخل دریا یا اقیانوس که روی فلات قاره سرازیر می‌شود نیز صادق باشد.

^۱ Turbidity Current