

بررسی تجربی اختلاط تلاطمی نزدیک یک مرز چگالی

عباسعلی علی اکبری بیدختی^{۱*}، فاطمه مالکی فرد^۲ و مسعود خوش‌سیما^۳

^۱ استاد گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ کارشناس ارشد سازمان هواشناسی کشور، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۳/۶/۲۹، پذیرش نهایی: ۸۶/۶/۱۷)

چکیده

در این مقاله یک بررسی تجربی روی فرایند اختلاط نزدیک مرز چگالی (بین شور و شیرین) در آزمایشگاه صورت گرفته است. نتایج عمدتاً شامل مشاهده مستقیم سرعت پدیده درون‌آمیختگی و ساختار تلاطم است. همچنین با استفاده از دو شوری‌سنج الکترونیکی دقیق با پاسخ مطلوب، پارامترهای تلاطم نزدیک مرز، از جمله شدت تلاطم، مقیاس‌های پیچک‌های تلاطمی و طیف تلاطم اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش Ri ، ساختارهای پیچکی تلاطم نزدیک مرز چگالی به شدت تغییر شکل می‌دهد و به ویژه در Ri های زیاد، مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی تلاطم، صرف ایجاد امواج درونی می‌شود. تغییرات درون‌آمیختگی به Ri^{-1} بستگی دارد که با نتایج دیگران همخوانی خوبی دارد. در حالی که لایه پایین مرز دارای چینه‌بندی چگالی خطی است، این وابستگی به صورت $Ri^{-1.3}$ است که احتمالاً به انتقال بخشی از انرژی تلاطم به صورت امواج درونی به پایین مرز، مربوط می‌شود. در این حالت آهنگ درون‌آمیختگی با زمان نیز، یکنواخت نیست که این خود یکی دیگر از نکاتی است که تا کنون به آن نپرداخته‌اند.

واژه‌های کلیدی: تلاطم، عدد ریچاردسن، ناپایداری، چینه‌بندی چگالی، درون‌آمیختگی

۱ مقدمه

روی اثر مرز چگالی (و قدرت پایداری آن، یعنی اختلاف چگالی دو طرف مرز) بر ساختار تلاطم صورت گرفته است (لیندن، ۱۹۹۱؛ مک‌گرات و همکاران، ۱۹۹۷). این بررسی‌ها نشان می‌دهد که بسته به Ri ، سازوکارهای متفاوتی در فرایند درون‌آمیختگی نزدیک مرز چگالی دخالت دارند.

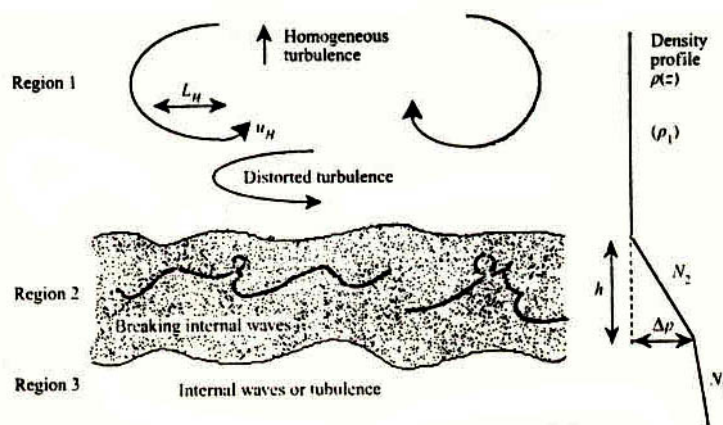
آب‌های محیط‌های دریایی و سواحل، اغلب دارای چینه‌بندی چگالی پایدارند (stratification)، که تأثیری مستقیم روی شدت تلاطم و در نتیجه ضرایب پخش پیچکی تلاطم دارد. به منظور شناخت کیفی و کمی، اغلب شرایط مشابهی از نظر چینه‌بندی چگالی در آزمایشگاه ایجاد و به طور دقیق تأثیر آن روی شدت تلاطم بررسی می‌شود (لیندن، ۱۹۸۱؛ بیدختی و بریتر، ۱۹۹۲ و ۲۰۰۲؛

مرزهای چگالی در آب‌های ساحلی، خورها و به‌طور کلی محیط‌های دریایی فراوان است. این مرزها که از ناپایداری شدیدی برخوردارند باعث سرکوب تلاطم می‌شود (عدد ریچاردسن Ri بسیار بیشتر از مقدار بحرانی ۰/۲۵ است) و در نتیجه آب‌های نزدیک این مرزها را از خاصیت پخش تلاطمی شدید محروم می‌کند. این امر نقش مؤثری در جلوگیری از پخش آلاینده‌ها و همین‌طور نفوذ اکسیژن به لایه پایینی دارد. همچنین کاهش تلاطم در نتیجه خاصیت پایداری هیدرودینامیکی مرز چگالی، می‌تواند در آب‌خورها، محیط مناسبی را برای ته‌نشست رسوبات آماده سازد (مثلاً در محل سر یک گوه نمک در خورها رسوب‌گذاری، عامل عمده ایجاد مشکلات کشتیرانی در این آب‌ها می‌شود). بررسی‌های قابل توجهی عمده‌ای

در این مقاله، یک بررسی تجربی روی تلاطم نزدیک مرز چگالی صورت می‌گیرد که در آن توزیع چگالی، هم حالت پله‌ای دارد و هم دارای چین‌بندی چگالی پیوسته است. البته حالت چین‌بندی شده کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و در این تحقیق روشن خواهیم ساخت که بر خلاف حالت چگالی پله‌ای که انتقال انرژی فقط در مرز صورت می‌گیرد، در صورت چین‌بندی بودن لایه زیرین انرژی تلاطمی به سراسر لایه زیرین منتقل می‌شود و این انتقال باعث فرسایش سریع‌تر مرز چگالی می‌شود. این حالت بی‌شابهت به مسئله استخرهای خورشیدی با گرادیان چگالی نیست که یک لایه آمیخته تلاطمی همرفتی در تماس با لایه گرادیانی است. تلاطم لایه آمیخته در این حالت باعث فرسایش دائمی لایه گرادیانی می‌شود که از نظر نگهداری گرما در استخر خورشیدی بسیار مهم است (بیدختی و محمدنژاد، ۱۳۷۶). ضمن ارائه نحوه آزمایش، نتایج کمی آن نیز ارائه می‌شود و به ویژه نتایج مربوط به حالتی با چین‌بندی پیوسته، مورد بحث قرار می‌گیرد.

بیدختی و محمدنژاد، ۱۳۷۶؛ مک‌گراث و همکاران، ۱۹۹۷).

این بررسی‌ها اغلب به‌منظور شناخت فیزیکی پدیده اختلاط، در محیط‌های دارای چین‌بندی چگالی که نیم‌رخ پله‌ای یا پیوسته دارند، صورت گرفته است. فرناندو و هانت (۱۹۹۷) این مسئله را برای حالت پله‌ای به صورت نظری بررسی کردند و مک‌گراث و همکاران (۱۹۹۷) نیز از نظر تجربی به این مسئله را پرداخته‌اند و نشان دادند که بسته به عدد ریچاردسن رژیم‌های متفاوتی از قبیل درون آمیختگی پیچکی، ناپایداری برشی با پیچک‌ها و شکست امواج داخلی، رخ می‌دهد. شکل ۱ نشان‌دهنده مناطق متفاوت نزدیک مرز است که این فرایندها به ترتیب در مناطق ۱، ۲ و ۳ رخ می‌دهند. ناحیه یک عمدتاً شامل تلاطم همگن و تغییر یافته است، و ناحیه دو تلاطمی و اغلب دارای حرکات موجی درونی در حال شکست است و ناحیه سه اغلب دارای امواج درونی، گاهی همراه با تلاطم است. بسته به دامنه عدد ریچاردسن، نحوه نفوذ تلاطم در مرز چگالی متفاوت است.



شکل ۱. رژیم‌های متفاوت حرکات تلاطمی نزدیک یک مرز چگالی (فرناندو و هانت، ۱۹۹۷).

است و بزرگ‌تر از آن معرف پایداری؛ حالتی که تلاطم نمی‌تواند وجود داشته باشد و یا اگر به‌وجود بیاید از بین می‌رود. در مرز چگالی، مثل سطح آب، اغلب امواجی با سرعت‌های بسیار کم (با توجه به اینکه اختلاف چگالی بین دو مرز نسبت به آب و هوا بسیار کمتر است) وجود دارند که تحت شرایطی (هنگامی که مقدار محلی Ri کمتر از صفر می‌شود) می‌توانند بشکنند و تولید تلاطم کنند. این ناپایداری معمولاً به‌صورت امواج کلونین-هلمهولتز ظاهر می‌شود که گاهی در جو (در ابرها) مستقیماً قابل مشاهده است.

در صورتی که نزدیک مرز چگالی، قسمت زیر مرز دارای چینه‌بندی چگالی پیوسته باشد، بخشی از انرژی به‌صورت امواج درونی از نزدیک مرز دور می‌شود. آشفتگی‌های با بسامد حدود N یا کمتر دارای انرژی حدود ۱۰ درصد مقدار انرژی تلاطم نزدیک مرز چگالی است (کارادرز و هانت، ۱۹۸۸). این انرژی ممکن است به مناطق خیلی دورتر از مرز چگالی نیز منتقل شود. این فرایند در زیر لایه آمیخته اقیانوسی و در مناطق عمیق زیر ترموکلاين نقش مؤثری در اختلاط و در نتیجه انتقال قائم دارد. در حقیقت اختلاط در اعماق اقیانوس به‌طور حیاتی وابسته به این فرایند است (مونین و از میدف، ۱۹۸۵).

۳ روش آزمایش

آزمایش‌ها در ظرفی از پلکسی‌گلاس شفاف به ابعاد $40 \times 40 \times 70$ cm صورت می‌گیرد. این ظرف دربرگیرنده دو لایه یکی آب شور و دیگری شیرین است. در لایه آب شیرین شبکه‌ای که اندازه سوراخ‌های آن 5cm و ضخامت نوارهای آن 2cm است، با بسامد خاص به نوسان درمی‌آید و تلاطم ایجاد می‌کند (شکل ۲). فاصله شبکه از مرز (h) است که با بسامد ω (مثلاً 2Hz) و دامنه کوچک حدود 1.5cm نوسان می‌کند. سرعت تلاطمی و مقیاس مشخصه با روابط زیر تابعی از

۲ معرفی شاخص‌های مربوط

هنگامی که تلاطم در نزدیک یک مرز چگالی رخ می‌دهد، می‌توان نشان داد که میزان درون آمیختگی ایجاد شده در مرز، بستگی به عدد ریچاردسن توده‌ای (bulk Richardson number) نزدیک مرز دارد (ترنر، ۱۹۷۶):

$$Ri = \frac{g\Delta\rho l}{\rho U^2} \quad \text{که} \quad \frac{U_e}{U} = F(Ri) = CRi^n \quad (1)$$

که در آن U_e سرعت درون آمیختگی (entrainment speed)، U سرعت مشخصه افت و خیز تلاطمی نزدیک مرز، l مقیاس مشخصه تلاطم، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی دو طرف مرز و ρ چگالی متوسط محیط است (شکل ۱). C و n ثابت‌هایی‌اند که معمولاً به‌صورت تجربی و یا از راه مشاهده در محیط به‌دست می‌آیند. این ثابت‌ها در تحقیقات گوناگون بسیار مورد بحث بوده‌اند و روشن شده است که بسته به نوع آزمایش، مقادیر آنها ممکن است متفاوت باشد و n عمدتاً مقداری حدود ۱- دارد. البته وقتی Ri خیلی بزرگ شود، احتمالاً عدد پکله $p_e = \frac{Ul}{k}$ که U سرعت افت و خیز تلاطمی، l مقیاس مشخصه تلاطم و k ضریب پخش مولکولی ماده است) نیز مهم است (زنگزاندو، ۱۹۹۱).

هنگامی که گرادیان قائم سرعت افقی (مثلاً $\frac{\partial u}{\partial z}$) در مرز وجود داشته باشد به جای عدد ریچاردسن توده‌ای باید از عدد ریچاردسن گرادیانی به مثابه عامل پایداری استفاده کرد یعنی:

$$N = \left[-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right]^{1/2} \quad \text{که} \quad Ri_g = \frac{N^2}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{1/2}} \quad (2)$$

N بسامد شناوری و $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ گرادیان چگالی نزدیک مرز است. مقادیر کمتر از ۰/۲۵ برای Ri_g معرف ناپایداری

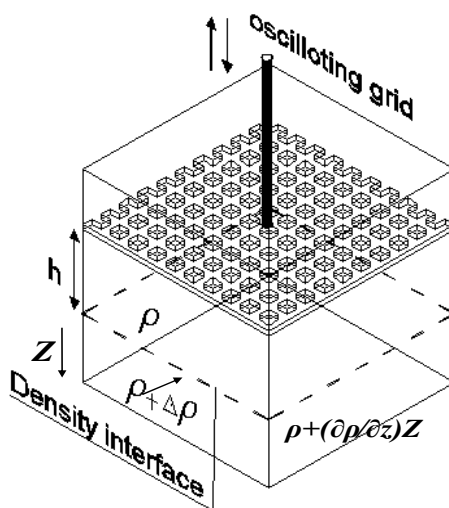
Z، فاصله از شبکه، داده می شوند:

$$\frac{dh}{dt} = U_e = UCRI^n \quad (۴)$$

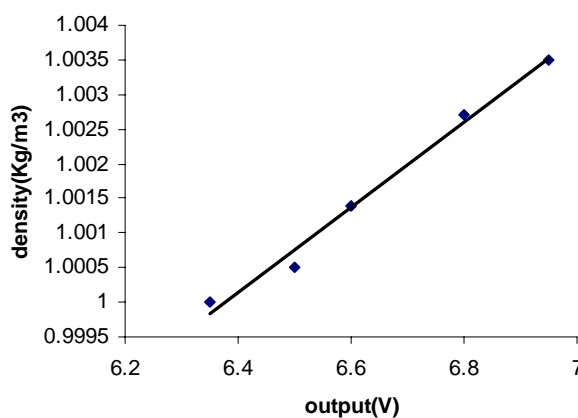
$$L = \beta z \quad \text{و} \quad U = \frac{\alpha \omega}{z} \quad (۳)$$

در این آزمایش با استفاده از اندازه گیری h و همین طور اندازه گیری سیگنال های شوری نزدیک مرز، نتایج لازم به دست می آید که می توان فرایند اختلاط نزدیک مرز چگالی را از نظر کمی بررسی کرد. چگالی سنج الکترونیکی استفاده شده دارای پاسخ مناسبی (2ms) است و نمونه ای از منحنی کالیبراسیون آن به شکل خطی است (شکل ۳).

که در دستگاه cgs مقادیر α و β به ترتیب برای شبکه استفاده شده 0.56 و 0.1 است (لیندن، ۱۹۹۱). هنگامی که تلاطم حاصل از نوسان شبکه به مرز می رسد باعث فرسایش مرز می شود. بنابراین، فاصله بین مرز و شبکه افزایش می یابد. تغییرات زمانی این فاصله، یک سرعت درون آمیختگی را نشان می دهد که وابسته به Ri است یعنی:



شکل ۲. ظرف آزمایش و نحوه عمل آن.



شکل ۳. منحنی کالیبراسیون چگالی سنج (شوری سنج) الکترونیکی.

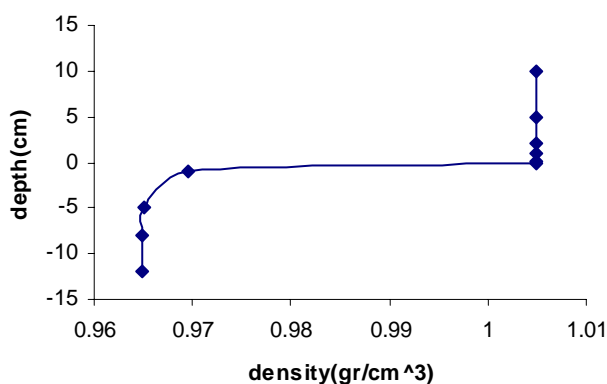
۴ نتایج و بحث آنها

$\left(\frac{dh}{dt}\right)$ برحسب Ri در شکل ۶ دیده می‌شوند که نشان دهنده روند کاهشی U_e برحسب Ri است.

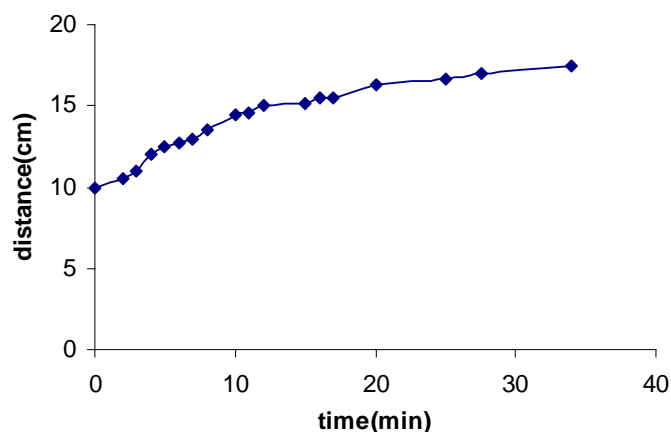
در ضمن خط برازش مناسب که حالت نمایی دارد نیز رسم شده است که معادله آن (برحسب cm/s) عبارت است از:

$$U_e = 0.13Ri^{-0.93} \quad (5)$$

آزمایش‌ها در دو حالت صورت گرفت، حالت اول برای نیمرخ پله‌ای و حالت دوم برای موقعیتی که لایه زیرین داری چینه‌بندی چگالی است. در حالت پله‌ای، تفاوت شوری بین دو لایه $10gr/L$ است که نیمرخ چگالی آن در شکل ۴ و تغییرات فاصله از مرز شبکه با زمان (برحسب دقیقه) در شکل ۵ نشان داده شده است. تغییرات U_e (یا



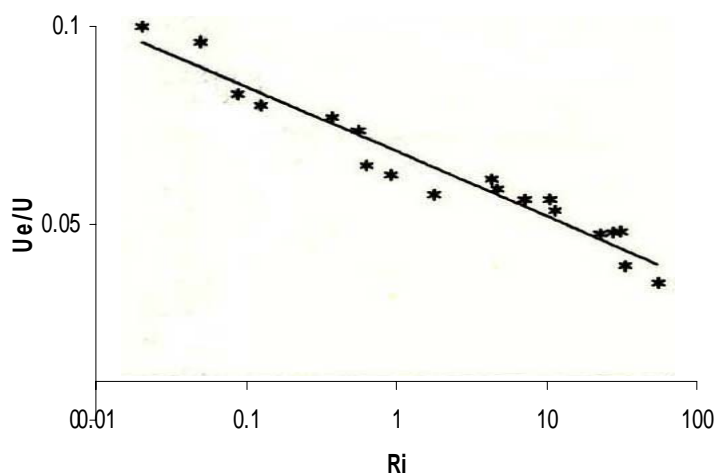
شکل ۴. حالت اولیه نیمرخ چگالی آزمایش برای حالت پله‌ای.



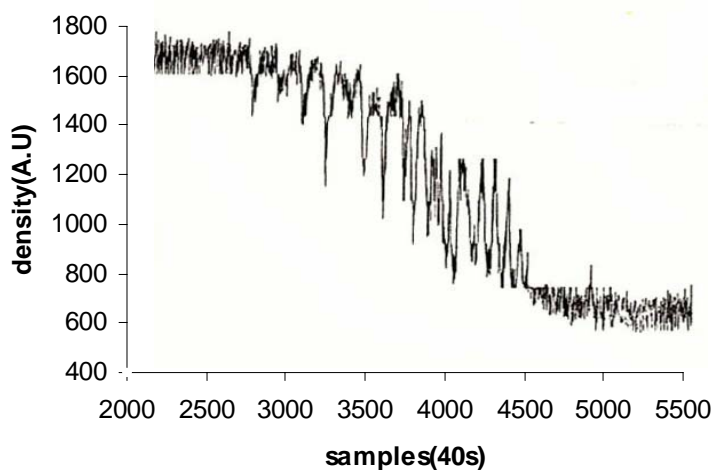
شکل ۵. تغییرات فاصله از شبکه با زمان.

است. سیگنال شوری در یک نقطه در حین اینکه مرز با فرسایش مرز، حرکت کرده و از پروب شوری سنج گذشته است در شکل ۷ دیده می‌شود. فاصله پروب از شبکه حدود ۱۰ سانتی‌متر است و نشان می‌دهد که افت و خیزهای تلاطمی، احتمالاً مربوط به شکست امواج درونی در مرز، بسیار تیزند (مک‌گرات و همکاران، ۱۹۹۷).

این رابطه با نتایج دیگران (مثلاً ترنر، ۱۹۷۶) که $n = -0.93$ را می‌دهد همخوانی خوبی دارد. البته عمدتاً مقدار آن را حدود ۱- اختیار می‌کنند. با توجه به پراکندگی نقاط در شکل ۶ که نشان‌دهنده خطاهای آزمایش است، این همخوانی، بسیار خوب است البته فرسایش مرز چگالی آن با Ri تقریباً یکنواخت و پیوسته



شکل ۶. تغییرات سرعت درون آمیختگی برحسب Ri در حالت با چینه بندی چگالی پله‌ای.

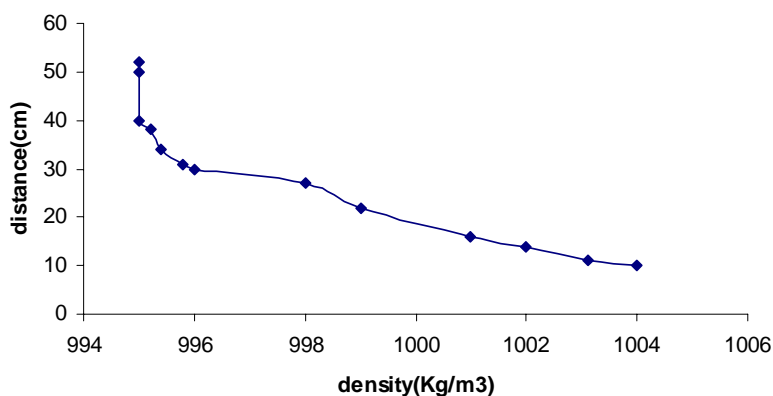


شکل ۷. سیگنال چگالی در حین حرکت مرز از روی چگالی سنج.

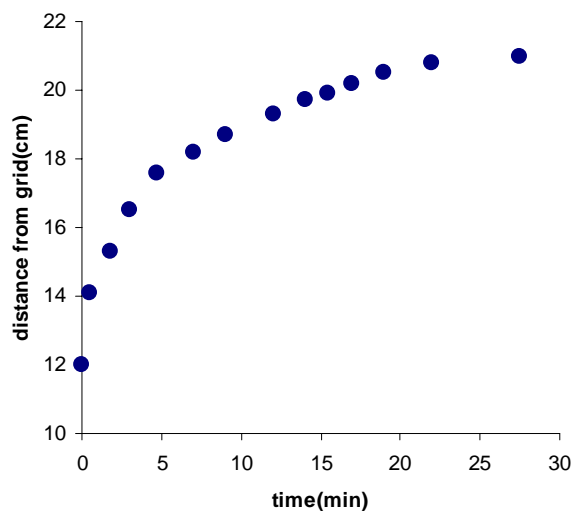
یکی از ویژگی‌های این آزمایش، وجود امواج داخلی در لایه زیرین با بسامد شناوری حدود $0.8 s^{-1}$ است (شکل ۱۰). به طوری که هر چه بسامد شناوری لایه دوم بیشتر باشد یا به عبارتی چینه‌بندی قوی‌تری داشته باشد، انرژی بیشتری منتقل می‌شود. منحنی سرعت درون آمیختگی U_e برحسب Ri نیز در شکل ۱۱ آمده است که نشان دهنده رابطه‌ای به شکل زیر است.

$$U_e = 3.12 Ri^{-1.3} \quad (۶)$$

در آزمایش دوم لایه زیرین دارای تغییرات پیوسته شوری از کف حدود $20 gr/L$ تا آب شیرین در مرز بوده است، نیمرخ چگالی این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. نیمرخ چگالی لایه پایین بسامد شناوری $N = 0.79 s^{-1}$ را می‌دهد. در این آزمایش تغییرات h با زمان خیلی سریع‌تر صورت می‌گیرد، چون Ri در این آزمایش، به ویژه در ابتدا کم است (شکل ۹).



شکل ۸. نیمرخ چگالی برای لایه پایین با چینه‌بندی پیوسته.

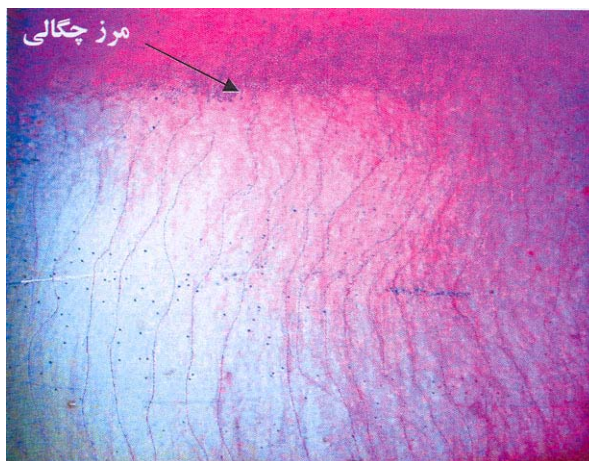


شکل ۹. تغییرات h برحسب زمان برای آزمایش دوم.

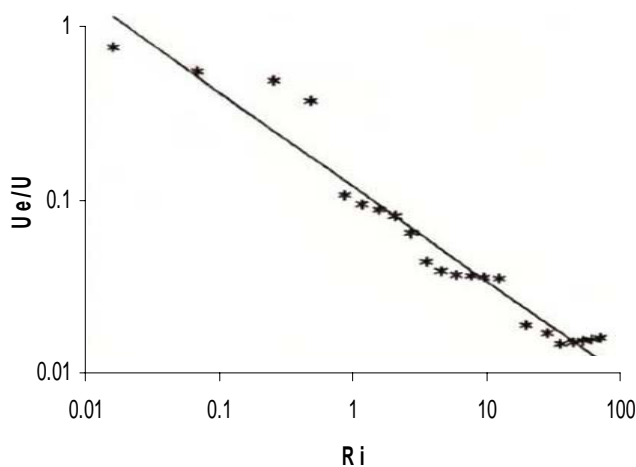
بدون اینکه فرسایش روی دهد و سپس با شکست امواج U_e زیاد می‌شود. این فرایند ممکن است تکرار شود. شبیه این فرایند که در آن چرخه امواج درونی \Leftarrow رشد آنها \Leftarrow شکست آنها \Leftarrow تلاطم تکرار می‌شود در درون دریا نیز رخ می‌دهد (مونین و ازمیدف، ۱۹۸۵).

سیگنال شوری همراه با طیف آن در شکل ۱۲ دیده می‌شود. این امواج تا بیش از 10cm زیر مرز مشاهده می‌شوند ولی با افزایش فاصله، از دامنه آنها کاسته می‌شود. در طیف این سیگنال (مربوط به فاصله 2cm

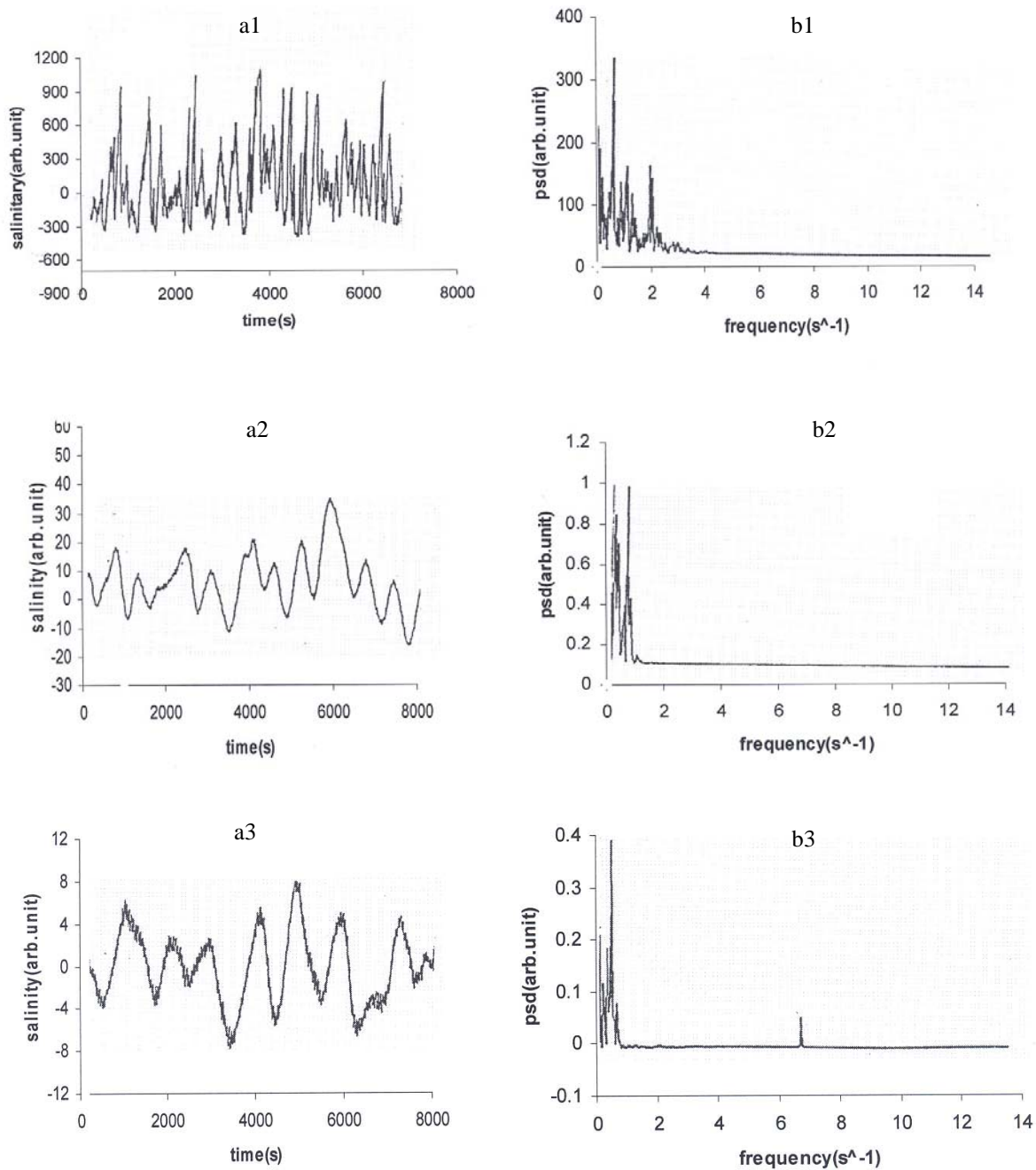
در این حالت توان افت U_e خیلی بیشتر از مقدار پله‌ای است که نشان دهنده وابستگی بسیار بیشتر U_e به Ri است. در تغییرات U_e (شکل ۱۱) حالت پله‌ای مشاهده می‌شود که نشانگر فرسایش مرز چگالی با Ri به صورت غیر پیوسته است. برای این مشاهدات نمی‌توان دلیل فیزیکی روشنی ارائه کرد ولی احتمالاً می‌تواند مربوط به فرایندی مرتبط با رشد امواج درونی و شکست آنها است. این فرایند ممکن است به صورت یک چرخه (سیکل) باشد که ضمن آن، ابتدا رشد امواج رخ می‌دهد



شکل ۱۰. عکسی از ساختار جریان نزدیک مرز چگالی (خطوط رنگی ساختار مدال قائم مربوط به امواج درونی را نشان می‌دهد).



شکل ۱۱. تغییرات سرعت درون آمیختگی برحسب Ri در حالت با چینش چگالی پیوسته.



شکل ۱۲. a3-a2-a1: سیگنال‌های شوری (سمت چپ) به ترتیب در ۰/۵ سانتی‌متری بالای مرز و دو عمق ۲ و ۶ سانتی‌متری زیر مرز چگالی پله‌ای و طیف‌های آنها (سمت راست) b3-b2-b1. با چینه‌بندی چگالی پیوسته.

(ابعاد تانک) با موارد مشابه در آزمایش‌های دیگران یکسان نیست، از این رو نتایج به دست آمده متفاوت است. از بررسی رشد لایه آمیخته و بررسی درون‌آمیزی منطقه درون‌آمیختگی لایه مرزی و انتشار امواج درونی در محیط‌هایی با چگالی چینه‌بندی شده می‌توان در حکم کاربرد روش‌های ارایه شده در مقاله نام برد.

بررسی بیشتر منطقه درون‌آمیختگی و تعیین نرخ درون‌آمیختگی و میزان انتقال انرژی در مرز چگالی به مثابه کارهای آینده پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شورای پژوهشی دانشگاه تهران و همچنین از اعمال نظرات ارزشمند داوران محترم قدردانی می‌شود.

مراجع

بیدختی، ع.، ۱۳۷۰، اثر چینه‌بندی چگالی روی ساختار تلاطم شبکه‌ای با و بدون اثر چینه‌بندی سرعت، اولین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، کرمان.
بیدختی، ع. و محمدنژاد، ع.، ۱۳۷۶، پایداری و بازده گرمایی یک استخر خورشیدی کوچک، مجله استقلال، شماره ۱۶.

- Bidokhti, A. A., and Britter, R. F., 1992, Experiments on grid turbulence in strongly stratified uniform and shear flows, *Enro, Mech.* 228, Lyon, France.
Bidokhti, A. A. and Britter, R. F., 2002, A large stratified shear flow channel facility, *Exp Fluids*, **33**, 281-287.
Carruthers, D. J., and Hunt, J. C. R., 1988, Turbulence waves and entrainment near density stratified layers *proc. I. M. A. Conf. on "Stratified Flow and Dense Gas Dispersion"*, Ed. J. S. Puttock, Clarendon Press, 77-96.
Fernando, H. S. J., and Hunt, J. C. R., 1997, turbulence, waves and mixing at shear free density interface. Part 1. A theoretical model, *J. Fluid. Mech.* Vol 374. 1997. pp. 235-262.
Gill, A., 1982, *Atmospheric-Ocean dynamics*, CUP, U.K.

زیر مرز) دو قله مشخص وجود دارد. محل قله برتر که در حدود 1Hz رخ می‌دهد بسیار نزدیک بسامد طبیعی لایه پایین یعنی بسامد شناوری حدود 0.8Hz است. این ویژگی تحریک امواج داخلی با تلاطم در لایه بالایی در اغلب شاره‌های طبیعی مثل دریا و یا جو دیده می‌شود (گیل، ۱۹۸۲).

۵ نتیجه‌گیری

در آزمایش‌های صورت گرفته برای نیم‌رخ چگالی پله‌ای، وجود روند یکنواخت و کاهشی U_e سرعت درون‌آمیزی برحسب Ri بیانگر آن است که امواج درونی فقط در مرز تشکیل می‌شوند و این امواج به لایه زیرین نفوذ نمی‌کنند. این آزمایش‌های اولیه به منظور کسب اطمینان از نتایج کارهای مشابه دیگران صورت گرفته، در اینجا ذکر شده است.

در بررسی‌های صورت گرفته با نیم‌رخ چگالی پیوسته یا حالتی که لایه زیرین دارای چینه‌بندی چگالی باشد؛ یا بخش عمده این پژوهش، روند غیریکنواخت و کاهشی سریع‌تر فرسایش مرز چگالی وجود دارد که علت آن علاوه بر وابستگی ضعیف‌تر سرعت درون‌آمیزی به عدد ریچارد سن Ri ، وجود و نفوذ امواج درونی به لایه زیرین است و ضمن آن انتقال انرژی به صورت مدهای امواج درونی به لایه زیرین صورت می‌گیرد. در این حالت ممکن است حدود ۱۰ درصد از انرژی تلاطمی به این قسمت منتقل شود. همچنین در فرسایش مرز چگالی نسبت به Ri با نیم‌رخ چگالی پیوسته، شاهد تغییرات U_e نسبت به عدد ریچاردسن به صورت پله‌ای و گسسته هستیم. نزدیکی دوره تناوب امواج درونی به بسامد شناوری لایه زیرین سبب تحریک امواج درونی به صورت فرایندی تناوبی، تشکیل امواج درونی - رشد آنها بدون فرسایش مرز و سپس شکست امواج و سرعت فرسایش زیاد می‌شود. به علت این که شرایط مرزی و شرایط آزمایش

- hear free density interfaces, part 2. Laboratory experiments, *J. Fluid Mech.*, **374**, 197-234.
- Turner, J. S., 1976, Buoyancy effects in liquids, CPU, U.K.
- Zargando, F., 1991, On the hydrodynamics of salt gradient solar ponds, *Sol Energy*, **46**, NO. 6, pp. 323-341.
- Monin and Ozmidov, 1985, *Turbulence in the ocean*, Springer, Holland.
- Linden, P. F., 1980, Mixing across a density interface produced by grid turbulence, *J. Fluid Mech.* Vol. 100 pp. 691-703.
- Linden, P. F., 1991, Laboratory experiments, GFD Summer School, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, Cambridge University, U.K.
- McGrath, J. L., Fernando H. S. J., and Hunt J. C. R., 1997, *Turbulence, waves and mixing at*