

# نقش امواج داخلی در ایجاد ساختار لایه‌ای محیط‌های دریایی

## شهمیر اقتصادی

واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی - سازمان هواشناسی کشور

## علی‌اکبری بیدختی

استادیار مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۴/۱۷، تاریخ تصویب ۸۲/۱۱/۴)

## چکیده

در این مقاله ضمن بررسی نظریه مدهای بهنجار امواج داخلی (درونی) به یک مطالعه میدانی در خلیج فارس و همچنین شبیه‌سازی آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. در ادامه این دو مورد با هم مقایسه و تفسیر می‌شود. مطالعات میدانی شامل منطقه‌ای در شمال غربی خلیج فارس است که پلوم آب رودخانه به آن می‌ریزد و همچنین چینش قوی چگالی در آن منطقه وجود دارد. این مطالعه بر اساس تحلیل نیمرخ‌های تکراری اندازه‌گیری شده در منطقه مورد نظر که در دوره کامل جزر و مدی قرار دارد، می‌باشد. مشاهدات بوضوح ساختار مدهای بهنجار امواج داخلی را نشان می‌دهد و ضخامت لایه‌ها بر اساس تغییرات شوری نسبت به عمق حدود ۲ متر و بر اساس نیمرخ‌های سرعت افقی حدود ۵ متر است که با نتایج محاسباتی بر اساس مدل تئوری مدهای بهنجار تطابق خوبی دارد. در قسمت بعدی این مطالعه مجموعه‌ای از آزمایشها در یک مخزن آزمایشگاهی انجام می‌شود و پلوم آب با شارهای شناوری (متناسب با دبی) مختلف وارد مخزن با چینش چگالی می‌شوند و نمونه‌ای از ساختارهای لایه‌ای با ضخامتهایی را بوجود می‌آورند که با مقیاس عمق پلوم قابل مقایسه است. نمونه لایه‌های تشکیل شده ( $\lambda/H \approx 0.5$ ،  $\lambda$  طول موج و  $H$  عمق پلوم) با مدل تئوری ارائه شده همخوانی بسیار خوبی دارد. در عین حال با استفاده از توزیع چگالی میدانی مشاهده شده، معادله مدهای بهنجار امواج داخلی به روش رانگ-کوتا<sup>۱</sup> حل و با نیمرخ‌های سرعت میدانی مقایسه شده که نتایج نسبتاً خوبی را نشان داده است و از نظر کیفی با مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. عدد رینولدز (Re) میدانی بزرگتر از عدد رینولدز بدست آمده در شبیه‌سازی آزمایشگاهی است، بنابراین مدهای بهنجار در محیط دریایی با افزایش عمق از بین می‌روند. قابل ذکر است که اندازه‌گیریها در خلیج فارس در یک محیط نیمه‌بسته دریایی انجام شده است ولی شبیه‌سازی آزمایشگاهی در محیط بسته بعمل آمده است به همین علت بعضی اختلافها در نتایج قابل اغماض است.

## واژه‌های کلیدی: امواج داخلی، مدهای بهنجار، مخزن در حال پر شدن، پلوم آب

## مقدمه

شماره به عنوان عامل ایجاد امواج ارائه می‌شود [۱]. در شکل ۱ نحوه ایجاد و گسترش امواج داخلی و انتشار انرژی بوسیله درهم‌ریختن یک منطقه در شاره با چینش چگالی که در سطوح همچگالی نشان داده شده است، ارائه می‌گردد. باید توجه داشت که سرعت گروه ( $C_g$ ) امواج داخلی جهت انتشار انرژی را نشان می‌دهد و سرعت فاز ( $C_p$ ) عمود بر سرعت گروه ( $C_g$ ) است. همچنین در شکل (۱) نشان داده می‌شود که انتشار انرژی در چهار جهت از منطقه انتشار می‌یابد.

با توجه به شکل (۱) ملاحظه می‌شود که هرگاه جریان نفوذی در شاره با چینش چگالی وارد شود امواج داخلی ایجاد شده و انرژی جریان نفوذی را در جهت‌های قائم

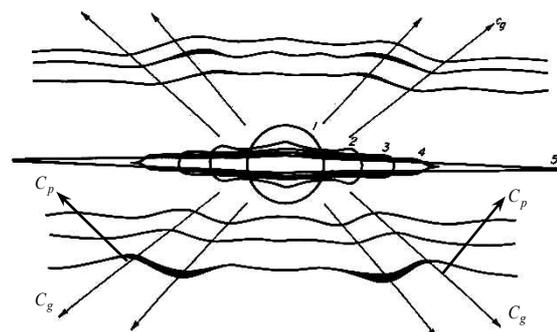
دریا مملو از ساختارهای لایه‌ای در نقاط مختلف است. تا کنون معمولاً نقش همرفت پخش دوگانه<sup>۲</sup> (ddc) بوسیله محققان مختلف بررسی شده ولی اخیراً مدهای بهنجار امواج داخلی نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌است و این خود در ایجاد ساختار لایه‌ای نقش دارد. لازم به ذکر است، این ساختارهای لایه‌ای در فرآیندهای پخش قائم نقش عمده را دارا می‌باشد.

در این مقاله تمرکز اصلی مطالعاتی و آزمایشگاهی بر روی امواج داخلی و شبیه‌سازی فیزیکی آنها قرار دارد. به منظور نشان دادن انتشار امواج داخلی در محیط‌هایی با چینش چگالی، ابتدا درهم‌ریختن یک منطقه در داخل

پلوم‌های مبتنی بر فرضیه درون آمیختگی تیلور<sup>۳</sup> و کمیت‌یابی شعاع، سرعت و چگالی پلوم بعنوان تابعی از فاصله قائم از منبع، فرموله کردند. آنها همچنین اثر محیط چینه‌بندی را بر ارتفاعی که یک پلوم در حال بالا آمدن به آن می‌رسد، تعیین نمودند. بینز و ترنر [۷] در تحقیقی دیگر تأکید کردند که در تعریف فوق بطور ضمنی فرض می‌شود که محیط نامحدود است. بطوریکه توزیع چگالی از قبل قابل تعیین شدن است و در خلال یک دوره مشخص تغییر نمی‌کند. بهر حال وقتی یک پلوم وارد یک حجم محدود می‌شود مثلاً وارد یک مخزن آزمایشگاه و یا یک حوضچه محدود اقیانوسی، موجب تغییر محیطش می‌شود و خصوصیات آن وابسته به زمان است. بینز و ترنر راه‌حلهایی برای شارش حالت پایا با زمان طولانی ارائه نمودند که در آن شارش خروجی پایین رونده از یک پلوم، (جریان خروجی پلوم) حرکت نسبتاً آرامی به طرف بالا در محیط ایجاد می‌کند و یک چینه‌بندی پایدار را در محیط برقرار می‌نماید. برطبق فرضیه درون‌آمیختگی، فرض بر این است که درون‌آمیختگی پلوم آب، در تمام عمق‌هایی که بالای شارش خروجی قرار دارند، آب را با یک آهنگ معین بطرف پلوم هدایت می‌کند. لایه ایجاد شده از شارش خروجی (منبع) پلوم در کف (یا در سطح در حالت پلوم با چگالی کمتر نسبت به محیط) یک چهارم عمق آب را اشغال می‌کند که این مطلب بوسیله مانینس [۸] بیان شده است. تکامل چینش توسط جرمز [۹] و وورستر و هاپرت [۱۰] مورد مطالعه واقع شده است. مدل "مخزن در حال پر شدن"<sup>۴</sup> با تغییرات عمده در بسیاری از مطالعات از جمله پرکردن مخزن‌های گاز مایع طبیعی (جرمز ۱۹۷۵)، شارش تلاطمی با مرز شیب‌دار بطرف پایین در اقیانوس (کیلورث [۱۱])، اثرات شارهای پلوم تابع زمان در تولید شارش آب کف اقیانوس (ترنر و کیلورث ۱۹۸۲)، توسعه چینش در محفظه‌های ماگما [۱۲] و تهیه ساختمانها (کوپر و لیندن [۱۳]) بکار برده شده است.

فرآیند "مخزن در حال پر شدن" عموماً در مخزن‌هایی که طول و عرض آنها قابل مقایسه با عمق آب است مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در تجزیه و تحلیل، فرض بر این است که حرکت‌های خارج پلوم ناچیز باشد. شواهدی وجود دارد که لایه‌هایی که توسط مدهای بهنجار موج داخلی گرانی تولید می‌شوند بوسیله شارش خروجی پلوم تحریک

منتشر می‌کند. این فرآیند در دریاها نقش مؤثری در ایجاد امواج داخلی دارد [۲، ۳]. البته ورزش باد در سطح دریاها نیز می‌تواند جریان‌های سطحی ایجاد کند که خود موجب ایجاد امواج داخلی با انتشار انرژی ( $C_g$ ) به داخل دریا شود [۴]. درحقیقت این یکی از فرآیندهای مهمی است که انرژی به شکل امواج داخلی به درون دریاهای آزاد انتشار یافته و در اثر شکست (تلاشی) امواج داخلی، تلاطم و اختلاط قائم ایجاد می‌کند.



شکل ۱: نحوه ایجاد امواج داخلی در اثر در هم‌ریختن یک منطقه در محیط شماره با چینش چگالی و انتشار انرژی توسط این امواج.

با تأکید دوباره باید عنوان نمود که عوامل مؤثر در ایجاد امواج داخلی متفاوت بوده و مثلاً یکی از آنها می‌تواند ورود پلوم رودخانه به دریای دارای چینه‌بندی چگالی باشد. عامل دیگر تنش باد است که در پیدایش امواج داخلی مؤثر می‌باشد. در امواج داخلی سرعت فاز و سرعت گروه تقریباً بر هم عمود هستند. در انتشار امواج داخلی لازم است به نحوه انتشار انرژی در آنها اشاره شود. جریان‌های داخلی مثل جریان خروجی ناشی از پلوم‌ها در شاره‌های با چینش چگالی (مثل اقیانوس)، می‌توانند امواج داخلی ایجاد کنند. اخیراً خروجی پلوم‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی موجب ایجاد امواج داخلی گردیده که توسط وانگ و همکاران مشاهده شده است [۵]. در اینجا به سابقه تحقیقاتی حرکت پلوم در محیط‌های بسته آزمایشگاهی با اشاره به اهمیت کاربرد آنها پرداخته می‌شود.

بیشتر مطالعات گذشته در زمینه پلوم‌های شناوری تلاطمی و بر نوع شارش پلوم متمرکز بوده است و توجه نسبتاً کمی به حرکت‌های شاره اطراف پلوم معطوف شده است. مورتن، تیلور و ترنر [۶] اولین بار یک مدل برای

در مقاله حاضر یک تحلیل میدانی از ساختارهای لایه‌ای که تحت تأثیر پلوم رودخانه و همچنین باد قرار دارد، ارائه می‌شود. سپس مدهای بهنجار امواج داخلی توسط یک مدل عددی برای این مشاهدات میدانی اجرا می‌شود و در ادامه یک کار آزمایشگاهی (در قسمتی از آن ورود پلوم آب شیرین به "مخزن درحال پرشدن" به منظور شبیه‌سازی ورود رودخانه به دریا که تا کنون انجام نگرفته است) نیز برای تعیین این ساختارها انجام می‌گردد.

### ساختار مدهای بهنجار امواج داخلی

به منظور حل معادله سرعت قائم در امواج داخلی روشهای متعددی پیشنهاد شده است که اساس آنها در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد. مؤلفه‌های آنی سرعت حرکت شاره ایجاد شده عبارتند از:

$$u^* = U(x, y, z) + u(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$v^* = V(x, y, z) + v(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$w^* = W(x, y, z) + w(x, y, z, t) \quad (3)$$

که در آن  $U$  و  $V$  و  $W$  مؤلفه‌های سرعت متوسط و  $u$  و  $v$  و  $w$  مؤلفه‌های سرعت اغتشاشی هستند.

با استفاده از معادلات حاکم بر حرکت شاره در امواج داخلی می‌توان معادله‌ای برحسب  $w^*$  (یعنی مؤلفه قائم) بدست آورد (جو رابرت ۱۹۷۵ [۱]).

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^2 w^* + N^2 \nabla_h^2 w^* + 4 \frac{N^2}{g} \Omega \cdot [\nabla \times (\Omega \times \mathbf{u}^*)] - 4 \Omega \cdot \nabla \times \left( \Omega \times \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial z} - \frac{N^2}{g} \frac{\partial^3 w^*}{\partial z \partial t^2} \right) = Q \quad (4)$$

که  $Q$  شامل جملات غیرخطی خواهد شد و  $N$  فرکانس شناوری است (رابطه ۹) و  $\Omega$  سرعت زاویه‌ای کره زمین است.

معادله ۴ معادله سرعت قائم برای امواج داخلی است و در حل آن ساده سازی‌های متعددی انجام می‌شود. در بیشتر راه‌حل‌های بکار رفته معمولاً کف بصورت افقی و غیر قابل نفوذ در نظر گرفته می‌شود. یعنی:

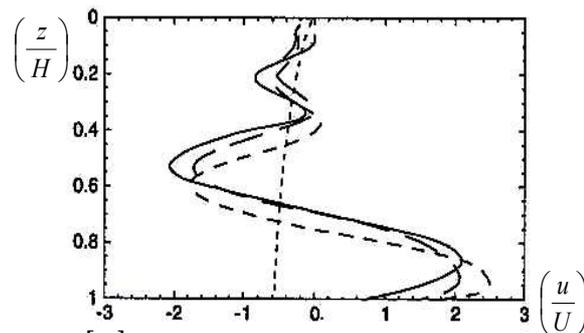
$$w^* = 0 \quad \text{در} \quad z = -D \quad (5)$$

می‌شوند که شبیه به مدهای ستونی تولید شده توسط نفوذ به داخل گردایان‌های چگالی است (مانینس [۱۴]) و نیز شبیه به حرکت افقی آرام در گردایان چگالی (برترتن [۱۵]) است.

در ادامه این تحقیقات (وانگ و همکاران [۲۰۰۱] [۵]) به کمک پلوم آب شور که وارد "مخزن درحال پرشدن" می‌شود، مدهای بهنجار امواج داخلی مشاهده و بررسی گردید.

وانگ و همکاران در محیط آزمایشگاه با استفاده از یک پلوم آب شور و "مخزن درحال پرشدن" مشاهده کردند که امواج داخلی در این محیط‌ها به آسانی می‌تواند ایجاد شوند. در شکل (۲) نمونه‌ای از کارهای وانگ و همکاران دیده می‌شود. محور افقی سرعت بدون بعد شده توسط سرعت جریان خروجی پلوم ایجاد کننده این امواج در کف مخزن ( $u/U$ )، و محور قائم عمق بدون بعد شده توسط عمق نفوذ پلوم ( $z/H$ ) ظرف اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

در این ساختار قائم، لایه‌های مربوط به مدهای بهنجار این امواج که پنج لایه است، ملاحظه می‌شود. از طرفی دامنه تغییرات سرعت افقی این لایه‌ها با فاصله از کف به شدت کاهش می‌یابد، این کاهش در اثر استهلاک این مدها توسط گرانیروی است. وانگ و همکاران (۲۰۰۱) اثر گرانیروی را نیز در مدلی برای ساختار لایه‌ای ارائه کردند.



شکل ۲: نمونه‌ای از کارهای وانگ و همکاران [۵]

که سرعت افقی بدون بعد مدهای بهنجار را بر حسب عمق بهنجار شده، نشان می‌دهد (سه آزمایش در این شکل نشان داده شده است).

لازم به ذکر است که ایجاد اغتشاش در یک قسمت شاره با چینش چگالی (مثلاً جریان خروجی پلوم در کف ظرف آزمایش، وانگ و همکاران ۲۰۰۱) می‌تواند این امواج داخلی را بوجود آورد.

برای تمام مقادیر  $x$  و  $y$  و  $z$  وجود دارد این است که:

$$\frac{1}{\omega^2 - f^2} \frac{\nabla_h^2 F}{F} = \frac{1}{N^2 - \omega^2} \left( \frac{d^2 W}{dz^2} - \frac{N^2}{g} \frac{dW}{dz} \right) \frac{1}{W} = -m \quad (13)$$

بطوریکه  $m$  ثابت جداسازی<sup>۶</sup> است. بنابراین:

$$\nabla_h^2 F + (\omega_0^2 + f^2) m F = 0 \quad (14)$$

$$\frac{d^2 W}{dz^2} - \frac{N^2}{g} \frac{dW}{dz} + (N^2 - \omega^2) m W = 0 \quad (15)$$

معادله ۱۴ شکل موج داخلی را بیان می‌کند و معادله ۱۵ معادله سرعت قائم یک موج داخلی را نشان می‌دهد. کراوس (Krauss 1966) نشان داد که (به رابرت ۱۹۷۳ [۱۶] مراجعه شود):

$$m = \frac{K_h^2}{\omega^2 - f^2} \quad (16)$$

بطوریکه  $K_h$  عدد موج افقی است.

$$K_h^2 = K_x^2 + K_y^2 \quad (17)$$

با فرض:

$$q(z) = [N^2(z) - \omega^2] \bar{\rho}(z) \quad (18)$$

با دوباره نویسی معادله ۱۵ با استفاده از شرایط مرزی ۵ و ۶ و همچنین استفاده از ۱۰ و ۱۱ می‌توان نوشت:

$$\frac{d}{dz} \left[ \bar{\rho}(z) \frac{dW}{dz} \right] + \left[ \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} \right] K_h^2 \bar{\rho}(z) W = 0 \quad (19)$$

که بنام معادله Sturm-Liouville معروف است. و یا:

$$\frac{d}{dz} \left[ \bar{\rho}(z) \frac{dW}{dz} \right] + m q(z) W = 0 \quad (20)$$

$$W(z) = 0 \quad z = -D \quad (21)$$

$$W(z) = 0 \quad z = 0 \quad (22)$$

برای اینکه معادله ۱۹ دارای جواب سینوسی (حل موجی) باشد باید  $\frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f^2} > 0$  و یا  $f < \omega < N$  باشد.

یعنی امواج داخلی مذکور باید دارای فرکانس کمتر از  $N$

بطوریکه  $D$  عمق دریا در نظر گرفته می‌شود. همچنین بطور معمول سطح بالایی دریا نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود (تقریب مرز سخت).

$$w^* = 0 \quad \text{در} \quad z = 0 \quad (6)$$

نشان داده شد که شرایط فوق برای ایجاد امواج داخلی مناسب است (فیلیپس ۱۹۶۶) و جنبه‌های ریاضی این فرض مورد بحث و توسعه قرار گرفت. فرضهای دقیق‌تری نیز در ساده‌سازی‌ها کاربرد دارد، مثلاً:

$$\bar{\rho} = \rho_0 \left( c_1 - N^2 \frac{z}{g} \right) \quad (7)$$

و یا:

$$\bar{\rho} = \rho_0 \exp\left(-N^2 \frac{z}{g}\right) \quad (8)$$

که در آن  $\frac{N^2}{g} = 10^{-5} m^{-1}$  و  $c_1 = 1$  و  $\rho_0 = 1 \text{ kg/lit}$

همان فرکانس شناوری یا فرکانس برانت - وایسلا می‌باشد.  $T_N = \frac{2\pi}{N} = 10 \text{ min}$ ، پیروید شناوری می‌باشد که

$$N^2 = \left[ -\frac{g}{\bar{\rho}(z)} \frac{d\bar{\rho}}{dz} \right] \quad (9)$$

در اینجا شرایط امواج آزاد در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه:

$$w = w_0(x, y, z) \exp(i\omega t) \quad (10)$$

که فرکانس زاویه‌ای موج است؛ با در نظر گرفتن شرایط مرزی ۵ و ۶ و با توجه به اینکه چگالی فقط به  $z$  بستگی دارد بطوریکه  $N = N(z)$ ، می‌توان نوشت:

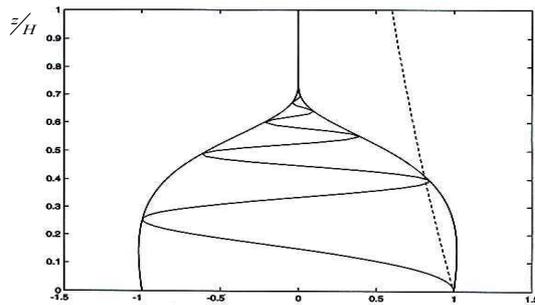
$$w_0(x, y, z) = W(z) F(x, y) \quad (11)$$

و معادله ۴ را بصورت زیر می‌توان نوشت (بدون جمله‌های غیرخطی):

$$\frac{1}{\omega^2 - f^2} \frac{\nabla_h^2 F}{F} - \frac{1}{N^2 - \omega^2} \left( \frac{d^2 W}{dz^2} - \frac{N^2}{g} \frac{dW}{dz} \right) \frac{1}{W} = 0 \quad (12)$$

در این معادله جمله اول فقط به  $x$  و  $y$  بستگی داشته و جمله دوم فقط تابع  $z$  است. در رابطه ۱۲ تنها راه‌حلی که

رابطه فوق پوش کامل دامنه سرعت افقی لایه‌های برشی را بعنوان تابعی از ارتفاع نشان می‌دهد. در این رابطه  $L$  طول مخزن،  $v$  گرانشی جنبش‌شناختی،  $A$  سطح مقطع افقی مخزن،  $E$  ضریب درون آمیختگی پلوم تعیین شده با آزمایش،  $H$  عمق پلوم ظرف،  $F$  شار شناوری از منبع پلوم در  $z=0$ ،  $g$  شتاب گرانی (تابعی از  $\xi$ ) و  $V$  سرعت قائم در محیط است. شکل (۳) نمونه‌ای از رسم معادله (۲۵) را در یک آزمایش معین نشان می‌دهد.



شکل ۳: پوش دامنه سرعت افقی بی‌بعد نسبت به ارتفاع بهنجار شده (بدون بعد) - خط چین شیب استهلاک ساختار مدهای بهنجار موج داخلی ایجاد شده در کف مخزن را نشان می‌دهد.

در ضمن مدل فوق پارامترهای مختلفی از جریان برای حالات ساده از جمله  $N$  ثابت می‌دهد که در زیر به آنها می‌پردازیم. عدد موج قائم در کف مخزن از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$m(0)H = \left( \frac{N(0)H}{V(0)} kH \right)^{1/2} = \left( \frac{B^{1/2}}{2EH^{1/2}} \right) \left[ \frac{n(\xi=1)}{f(\xi=1)} \right]^{1/2} = 2.02 \left( \frac{B^{1/2}}{2EH^{1/2}} \right) \quad (26)$$

که رابطه (۲۶) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{2\pi H}{\lambda(0)} = 2.02 \left( \frac{B}{H} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{2E} \right) \Rightarrow \frac{2\pi H}{\lambda(0)} = 2.02 \left( \frac{B}{H} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{0.26} \right)$$

در رابطه (۲۶)،  $N$  فرکانس شناوری،  $k$  عدد موج افقی،  $2E = 0.26$  و  $B$  پهناي مخزن است. از این رابطه می‌توان ضخامت لایه‌های برشی حاصل از مدهای بهنجار امواج داخلی را محاسبه کرد که ما نیز از آن استفاده خواهیم نمود.

با استفاده از رابطه (۲۶) رابطه (۲۵) بصورت زیر بیان می‌شود:

و بیشتر از  $f$  باشند (روش Runge-Kutta در حل معادله دیفرانسیلی ۱۹).

معادله ۲۰ و شرایط مرزی ۲۱ و ۲۲ اساس فرضیات و راه‌حل‌های متعددی برای تعیین مدهای بهنجار بروشهای تحلیلی و عددی قرار گرفته‌اند.

وانگ و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقات خود مدلی را برای ساختار مدهای بهنجار امواج داخلی در یک "مخزن در حال پرشدن" ارائه نمودند که در آن اثرات گرانشی را نیز مورد بحث و آزمایش قرار دادند و در اینجا اشاره مختصری به آن خواهد شد.

حل معادلات پلوم در یک کانال محدود برای "مخزن در حال پرشدن" توزیع فرکانس شناوری را به شکل زیر می‌دهد (مثلاً بینز و ترنر ۱۹۶۹):

$$N(z) = \frac{F^{1/3}}{2^{2/3} E^{2/3} \pi^{1/3} H^{4/3}} \left( 2.18\xi^{-5/3} + 0.279\xi^{-2/3} + 0.083\xi^{1/3} + \dots \right)^{1/2} = \frac{F^{1/3}}{2^{2/3} E^{2/3} \pi^{1/3} H^{4/3}} n(\xi) \quad (23)$$

$$n(\xi) = 1.48\xi^{-5/6} + 0.0945\xi^{1/6} + 0.0251\xi^{7/6} + \dots$$

$$\xi = \frac{z}{H} \quad (24)$$

در روابط فوق  $E$  ضریب درون آمیختگی پلوم است که در آزمایش تعیین می‌شود و  $H$  عمق پلوم و  $\xi$  جابجایی قائم است.

حل مدل مذکور ساختاری را که در شکل (۳) نشان داده شده است، ایجاد می‌کند. این ساختار نشان می‌دهد که اثر گرانشی بوضوح دامنه مدهای بهنجار را با  $z$  کاهش می‌دهد. وانگ و همکاران (۲۰۰۱) مجموعه‌ای از روابط مفید و در نهایت رابطه‌ای را برای استهلاک دامنه مدهایی بهنجار با عمق بدست آوردند که در زیر بعضی از آنها ذکر می‌شود. مثلاً تغییرات دامنه سرعت افقی مدهای بهنجار عبارت است از:

$$C(z) \approx \left[ \frac{V(0)}{V(z)} \right]^{1/2} \exp \left[ -\frac{v}{2L} \frac{A^2}{2^{10/3} E^{10/3} \pi^{2/3} H^{11/3} F^{1/3}} g(\xi) \right] \quad (25)$$

بهنجار امواج داخلی در ایجاد ساختارهای لایه‌ای در این نیمرخ‌ها می‌پردازیم. با توجه به اینکه این داده‌ها در عرض جغرافیایی (29°, 42' N) و طول جغرافیایی (48°, 45' E) و در محل اثر پلوم طبیعی رودخانه‌ها به خلیج فارس گرفته شده‌اند وضعیت مناسبی برای مطالعه امواج داخلی در این قسمت خلیج را فراهم می‌نمایند.

پلوم رودخانه ورودی به خلیج فارس در شکل (۴) مشاهده می‌شود. البته در این شکل مناطق شمالی خلیج فارس که با فراچاهی<sup>۹</sup> (منطقه k3) همراه است، مشخص شده است.

با استفاده از داده‌های ۲۱ گانه که در تاریخ‌های ۲۹ و ۳۰ ماه ژوئن سال ۲۰۰۰ اندازه‌گیری شده، نیمرخ‌های مختلفی بدست آمده که به آن پرداخته می‌شود. داده‌های مذکور توسط بخش علوم دریایی دانشگاه اهواز بدست آمده است. این داده‌ها شامل نیمرخ‌های الف: سرعت افقی (نمای سرعت افقی و میانگین آن نسبت به عمق)، ب: شوری (نمای شوری و میانگین متحرک سه نقطه‌ای شوری و میانگین کلی شوری برحسب عمق)، ج: شوری (نمای منحنی شوری و انحراف از میانگین سه نقطه‌ای شوری برحسب عمق) د: دما (نمای منحنی دما و میانگین آن برحسب عمق) و ه: چگالی و فرکانس شناوری (نمای منحنی چگالی و فرکانس شناوری برحسب عمق و برآزش یک منحنی نمایی به فرکانس شناوری) (sigma-T) می‌باشند که در یک دوره کامل جزر و مدی بدست آمده‌اند. تغییرات زمانی این نیمرخ‌های قائم کاملاً محسوس است. لازم به یادآوری است که حرکات جزر و مدی سرعت افقی بطور متوسط می‌تواند منفی و یا مثبت باشد. باید توجه داشت داده‌های سرعت افقی تنها در پنج نقطه در جهت قائم اندازه‌گیری شده و مانند سایر پارامترها دارای تفکیک خیلی خوبی در جهت قائم نیست. بطور کلی نیمرخ‌ها در ساعت‌های مختلف تغییرات دوره‌ای را نشان می‌دهند که مربوط به حرکات جزر و مدی و تغییرات افقی ساختار قائم مشخصه‌های ستون آب است. حداقل سه تا چهار بار تغییرات تکرار می‌شود (با توجه به اینکه مدت زمان اندازه‌گیری ۲۱ ساعت است).

ساختار لایه‌ای عمدتاً در قسمت فوقانی ستون آب مشاهده می‌شود که احتمالاً پلوم رودخانه ورودی به خلیج فارس در ایجاد آن نقش عمده را دارا است. تعداد لایه‌ها از ۳ تا ۸ متغیر است و ضخامت آنها به طور متوسط حدود

$$C(z) = \left[ \frac{f(\xi=1)}{f(\xi)} \right]^{1/2} \exp \left[ -\frac{m^4(0)H^4}{2\pi Re L'} \frac{f^2(\xi=1)}{n(\xi=1)} g(\xi) \right] \quad (27)$$

در این رابطه  $L' = \frac{H}{L}$  نسبت ابعاد<sup>۱۰</sup> و  $Re$  عدد رینولدز است،  $H$  و  $L$  بترتیب ارتفاع و طول ظرف هستند:

$$Re = \frac{N(z=0)H^2}{\nu}$$

جواب دیگری همانند  $C(z)$  وجود دارد که با رابطه زیر بیان می‌شود و همان وابستگی‌ها را به پارامترهای آزمایشگاهی دارد:

$$C_1(z) = \exp \left[ -\frac{\nu}{2L} \frac{A^2}{2^{10/3} E^{10/3} \pi^{2/3} H^{11/3} F^{1/3}} \frac{n(\xi=1)}{f^2(\xi=1)} \frac{z}{H} \right] = \exp \left[ -\frac{m^4(0)H^4}{2\pi Re L'} \frac{z}{H} \right]$$

$$\gamma \propto \frac{[m(0)H]^4}{2\pi Re(H/L)} \quad Re = \frac{NH^2}{\nu}$$

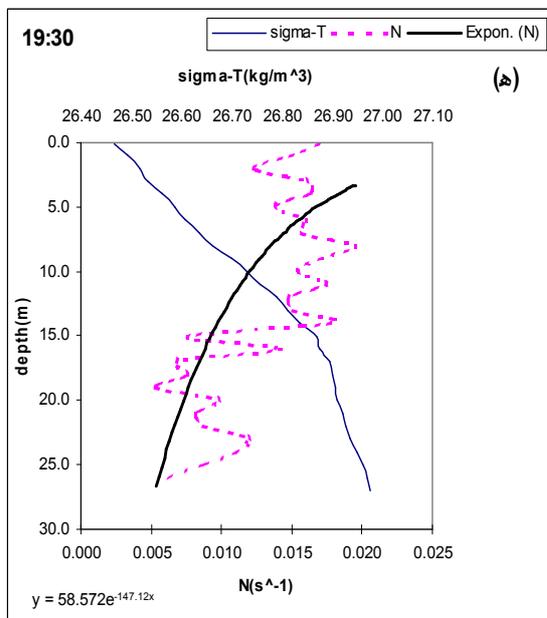
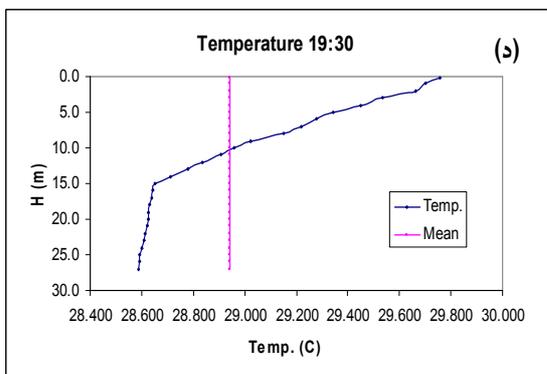
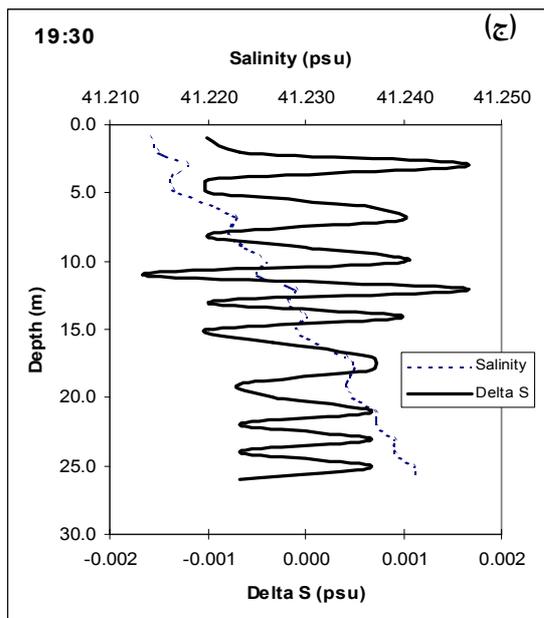
$\gamma$  نقش ضریب استهلاک دامنه سرعت افقی مدهای بهنجار را با ارتفاع ایفا می‌کند،  $N$  فرکانس شناوری محیط است،  $\nu$  ضریب گرانی در آزمایشگاه ( $10^{-6} m^2/s$ )، مولکولی و در دریا ( $10^{-4} m^2/s$ ) تلاطمی است. همچنین رابطه زیر پیش‌بینی سرعت شارش خروجی بدون بعد را نشان می‌دهد:

$$u(0) \approx 0.254 \frac{L}{L-x} m(0)H \quad (28)$$

که در آن  $L$  طول ظرف مخزن،  $x$  فاصله از پلوم و  $m$  عدد موج قائم در کف است. از روابط فوق برای محاسبه سرعت افقی مدهای بهنجار در محیط آزمایشگاهی و میدانی (خلیج فارس) استفاده خواهد شد.

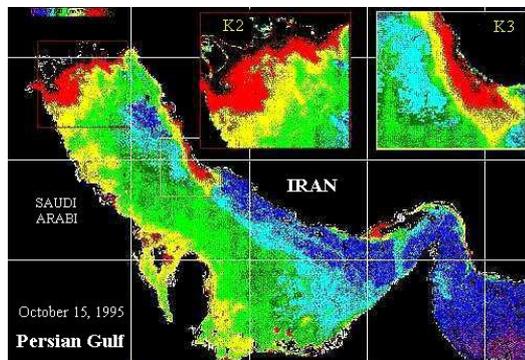
### مطالعه میدانی

در این بخش از داده‌هایی که در مناطق شمال غربی خلیج فارس جمع آوری شده استفاده و به رسم نمودارهای مختلف و مقایسه آنها با هم و نقش مدهای

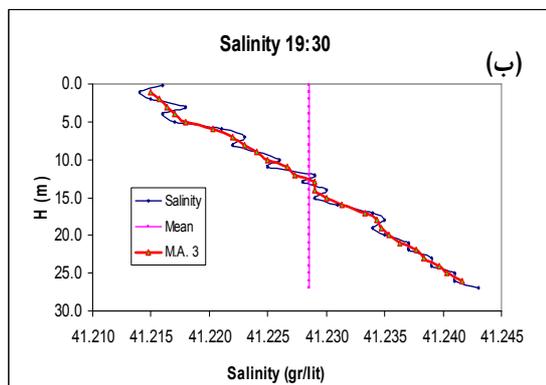
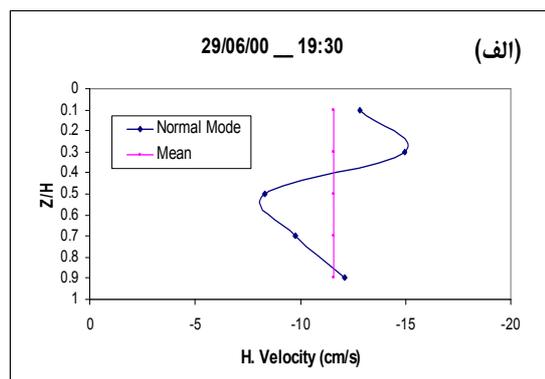


شکل ۵: ساعت ۱۹:۳۰ مورخ ۲۰۰۰/۰۶/۲۹  
 (ج) شوری و انحراف از میانگین سه نقطه‌ای شوری برحسب عمق (د) و میانگین آن برحسب عمق (ه) چگالی و فرکانس شناوری برحسب عمق و برازش یک منحنی نمایی به فرکانس شناوری در  $(29^\circ, 42' N)$  و  $(48^\circ, 45' E)$ .

دو متر می‌باشد (با استفاده از منحنی شوری زیرا داده‌های سرعت افقی تنها در پنج نقطه در جهت قائم اندازه‌گیری شده و مانند سایر پارامترها دارای تفکیک خیلی خوبی در جهت قائم نیست).

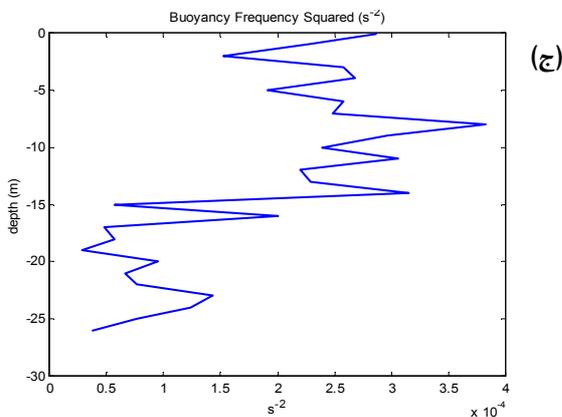
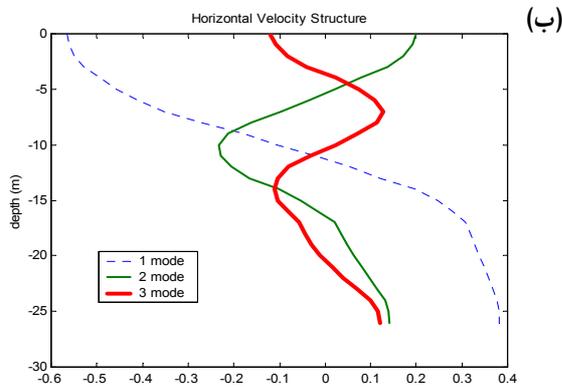
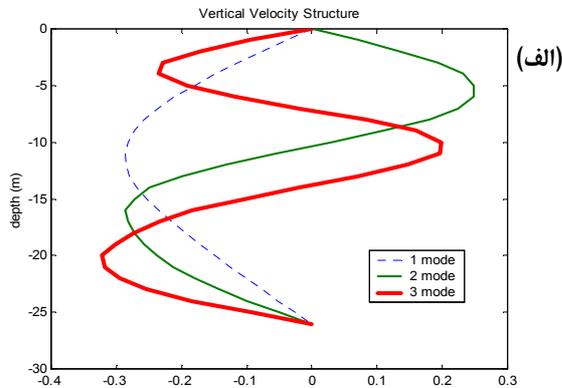


شکل ۴: تصویر ماهواره‌ای از خلیج فارس در اکتبر ۱۹۹۵. اثر قوی پلوم رودخانه در شمال غربی خلیج فارس و سواحل ایران مشاهده می‌شود. K2 منطقه پلوم رودخانه و K3 منطقه فراچاهی (upwelling) را نشان می‌دهد.  
 (<http://mpo.rsmas.miami.edu>)



شکل ۵: ساعت ۱۹:۳۰ مورخ ۲۰۰۰/۰۶/۲۹  
 (الف) سرعت افقی و میانگین آن نسبت به عمق (ب) شوری و میانگین متحرک سه نقطه‌ای شوری و میانگین کلی شوری برحسب عمق در عرض جغرافیایی  $(29^\circ, 42' N)$  و طول جغرافیایی  $(48^\circ, 45' E)$ .

بنابراین مثلاً تعداد دو قله در نیمرخ  $u$  معرف مد ۳ است (شکل ۶ ب). همچنین تعداد مدها در زمان اجرای این برنامه در اختیار اپراتور است که در اینجا بمنظور اجتناب از شلوغ شدن شکل‌ها به مد ۳ بسنده نمودیم.



شکل ۶: محاسبه (الف) ساختار سرعت قائم (ب) ساختار سرعت افقی (ج) مربع فرکانس شناوری در ساعت ۱۹:۳۰ مورخ ۲۰۰۰/۰۶/۲۹ با استفاده از حل عددی. در هر سه شکل محور قائم عمق بر حسب متر و محور افقی در شکل‌های (الف و ب) سرعت بهنجار شده و در شکل (ج) معکوس مربع ثانیه است.

البته ساختار لایه‌ای ظریف‌تر (تعداد لایه‌ها بیشتر و با ضخامت کمتر) در نیمرخ‌های قائم شوری (بویژه  $\Delta S$ ) و  $N$

در قسمت نزدیک کف یک لایه نسبتاً آمیخته به ویژه در نیمرخ دما مشاهده می‌شود که مربوط به اختلاط شدید جزر و مدی در نزدیک کف است.

در عمده قسمتهای ستون آب به ویژه در بیشتر قسمتهای میانی، عدد ریچاردسون ( $Ri$ ) معمولاً خیلی بیشتر از ۱ (حدوداً ۵) است که نشانگر پایداری ستون آب می‌باشد  $Ri = \frac{N^2}{(\partial U / \partial z)^2}$  که در آن  $N$  فرکانس شناوری و  $U$  سرعت و  $z$  عمق است.

به طور موضعی در قسمتهای از نیمرخ‌های زیگماتی ستون آب ناپایداری استاتیکی (ایستابی) مشاهده می‌شود، که این نشانگر جریانهای غیرهمچگال<sup>۱۰</sup> می‌باشد. ساختار سرعت قائم مدهای بهنجار قابل محاسبه است که در بخش بعد نمونه‌ای از آن انجام و ارائه می‌شود.

### حل عددی معادله ساختار مدی امواج داخلی

در این قسمت با استفاده از روش رانگ-کوتا و به کمک نرم‌افزار MATLAB 5.3.1 معادله ساختار مدی امواج داخلی یعنی معادلات (۲۰ و ۲۱) با انجام برخی ساده‌سازیها حل می‌شود و نتایج آن بصورت منحنیهای سرعت افقی و سرعت قائم و مربع فرکانس شناوری ارائه می‌گردد.

$$\frac{d}{dz} \left[ \bar{\rho}(z) \frac{dW}{dz} \right] + m q(z) W = 0 \quad (20)$$

$$W(z) = 0 \quad z = -D \quad (21)$$

$$W(z) = 0 \quad z = 0 \quad (22)$$

بعد از حل معادلات فوق با استفاده از داده‌های واقعی در منطقه شمال غربی خلیج فارس شکل (۶ الف، ب و ج) برای مجموعه اندازه‌گیری شده در زمان معین، بدست می‌آید، (مثلاً در زمان ۱۹:۳۰ در مورخه ۲۰۰۰/۰۶/۲۹).

مقایسه ساده‌ای بین سرعت افقی شکل (۵ الف) و شکل (۶ ب) مشخص می‌کند که مد سوم حل عددی با اندازه‌گیری خلیج فارس تطابق خوبی دارد. قابل ذکر است که تعداد قله‌ها در ساختار مدی موج داخلی برای نیمرخ‌های  $w$  یکی بیشتر از تعداد قله‌ها برای  $u$ ، سرعت افقی است که در این اندازه‌گیری‌ها انجام شده‌است.

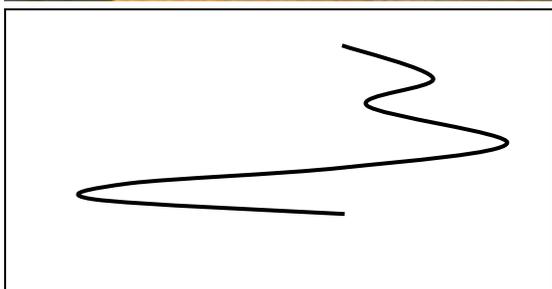
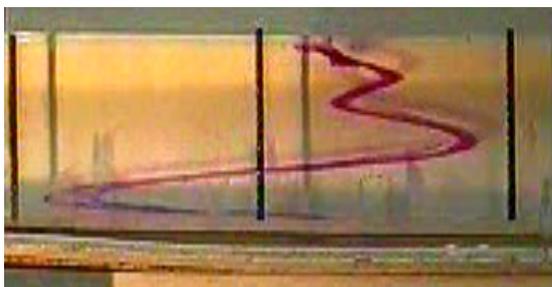
مشخص (شار شناوری معین) وارد مخزن کرده است. شار شناوری برای پلوم ایجاد شده عبارت است از:

$$F = qg' \quad (29)$$

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g \quad (30)$$

که  $F$  شار شناوری (برحسب  $m^4s^{-3}$ )،  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته و  $\rho$  چگالی متوسط آب داخلی مخزن است.  $q$  دبی حجمی ورود آب پلوم به داخل مخزن می باشد (بر حسب  $cm^3/s$  یا  $m^3/s$ ).

برای مشاهده شکل مدهای بهنجار امواج داخلی ایجاد شده معمولاً مقدار کمی پرمنگنات پتاسیم (بصورت پودر) به وسط ظرف افزوده شد. ساختار مدهای بهنجار را با مشاهده مستقیم، با دوربین فیلم برداری و گاهی با دوربین عکاسی مشاهده و مطالعه شد. هشت آزمایش، جداگانه انجام شده که هر کدام دارای ویژگی های خاص است. بنابراین نتایج مربوط به هر یک جدا از هم مطالعه می شود.



شکل ۸: ورود پلوم آب شور به "مخزن درحال پرشدن" با زاویه ۹۰ درجه .

### آزمایش ورود پلوم آب شور به "مخزن درحال پرشدن"

در این آزمایش پلوم آب شور با چگالی  $1.15 \text{ kg/lit}$  و شار شناوری  $4.6 \times 10^{-7} m^4s^{-3}$  وارد "مخزن درحال

مشاهده می شود که مربوط به فرارفت لایه ها توسط سرعت قائم می باشد (وانگ و همکاران ۲۰۰۱).

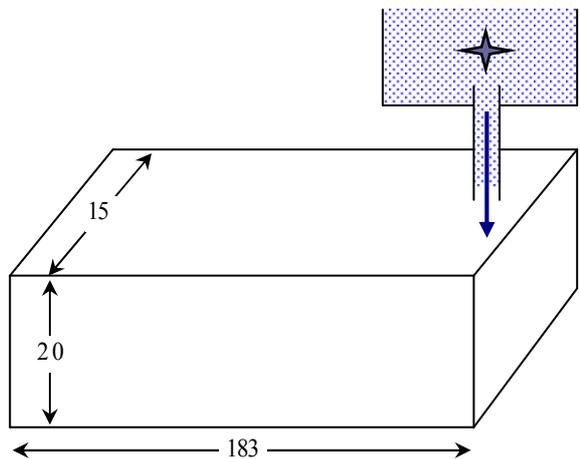
شکل (۶) از حل معادله (۲۰) و با شرایط مرزی (۲۱) و (۲۲) و با شرایط اولیه اندازه گیری شده در ساعت و روز فوق الذکر در خلیج فارس بدست آمده است.

### شبیه سازی امواج داخلی در محیط آزمایشگاه

مجموعه ای از آزمایشهای مختلف به منظور شبیه سازی مدهای بهنجار امواج داخلی در یک مخزن به ابعاد  $(183 \times 15 \times 20)$  سانتی متر مکعب انجام شده است (شکل ۷). این آزمایشها از نظر نحوه ایجاد امواج داخلی به سه گروه تقسیم می شوند.

گروه اول بر اساس ورود پلوم آب شور به "مخزن درحال پرشدن" بوده است.

گروه دوم صرفاً به منظور شبیه سازی ورود یک رودخانه به دریا و حاصل مطالعات و بررسیهای انجام گرفته در خلیج فارس و وجود اطلاعات در نزدیک قسمتهای شمال غربی خلیج فارس می باشد. در این گروه از آزمایشها پلوم آب شیرین به "مخزن درحال پرشدن" وارد می شود. گروه سوم به منظور شبیه سازی امواج داخلی با عامل تولید باد است که این قسمت کوتاه، و صرفاً از نظر کیفی به آن می پردازیم.



شکل ۷: مخزن آب به ابعاد  $(183 \times 15 \times 20) \text{ cm}^3$  که پلوم ورودی در  $1 \text{ cm}$  زیر سطح آزاد آن واقع شده است.

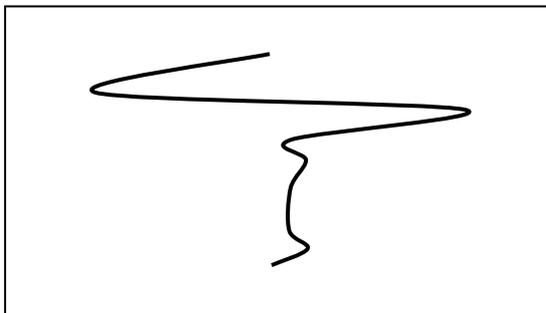
در بعضی آزمایشها مخزن را به شکل "مخزن درحال پرشدن" آماده نمودیم و به روشهای مختلف در آب داخل مخزن ایجاد چینش شده است (جدول ۱). پلومی که وارد مخزن شده است؛ آب شور یا آب شیرین را با آهنگ

### آزمایش ورود آب شیرین به مخزن با زاویه ۴۰ درجه

در این آزمایش پلوم آب شیرین با زاویه ۴۰ درجه نسبت به سطح آزاد آب وارد مخزن آزمایش که بطور کاملاً خطی چینیه‌بندی شده، با شار شناوری  $1.15 \times 10^{-8} m^4 s^{-3}$  می‌شود. در این آزمایش همچنین انرژی و مدهای بهنجار از بالا به پایین مستهلک می‌شوند. شکل مدهای بهنجار این آزمایش در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. ساختار مدی در این آزمایش مشابه آزمایش قبلی است. تعداد لایه‌ها سه و ضخامت آنها یکنواخت‌تر نسبت به یکدیگر است.

### شبیه‌سازی امواج داخلی به کمک باد

در این آزمایش "مخزن درحال پرشدن" را به شکل معمول آماده و به جای پلوم آب از یک بادبزن الکتریکی استفاده نمودیم (شکل ۱۱). باد ایجاد شده با زاویه خیلی کوچکی (نزدیک به صفر) به موازات سطح آزاد مایع می‌وزید. گسترش مدهای بهنجار بویژه در نزدیک سطح (مجاورت چشمه انرژی) کاملاً مشهود است. این آزمایش شبیه حالتی است که در عمده مناطق خلیج فارس (قسمتهای میانی) امکان رخ دادن دارد.



شکل ۱۰: ورود پلوم آب شیرین به مخزن آزمایش با چینیه‌بندی کاملاً خطی با زاویه ۴۰ درجه نسبت به سطح آزاد.

پرشدن" می‌شود. پلوم آب شور با سطح آب زاویه ۹۰ درجه دارد (حالت قائم). محل ورود آب به داخل مخزن در یک سانتی‌متری زیر سطح آزاد آب است. این آزمایش مشابه کارهای وانگ و همکاران می‌باشد. شکل (۸) ساختار قائم مدهای بهنجار (تغییرات خط رنگ از وضعیت قائم) را در این آزمایش نشان می‌دهد.

لایه‌های برشی در این ساختار قائم سرعت افقی کاملاً مشهود است. همچنین دامنه تغییرات با ارتفاع بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که نشانگر اثر گرانیروی روی این مدها است. ضخامت لایه‌ها در حد ود ( $\lambda/H \approx 0.5$ ) است.

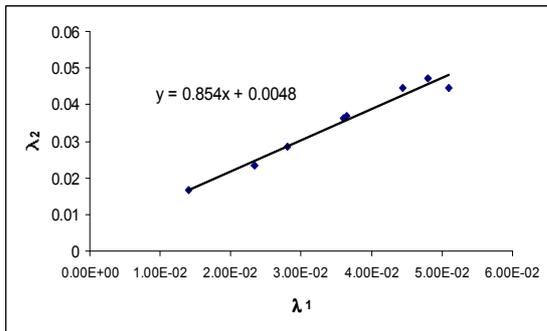


شکل ۹: ورود پلوم آب شیرین به "مخزن درحال پرشدن" با زاویه ۹۰ درجه.

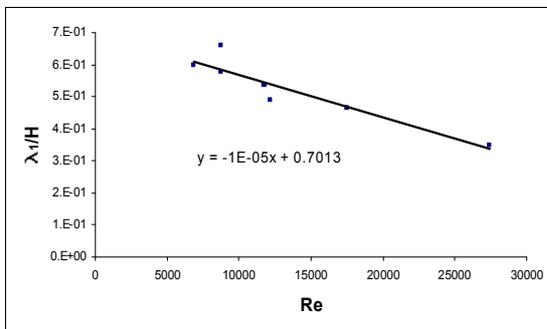
### آزمایش ورود آب شیرین به "مخزن درحال پرشدن" با زاویه ۹۰ درجه

در این آزمایش پلوم آب شیرین با زاویه ۹۰ درجه به "مخزن درحال پرشدن" که از آزمایش روز قبل باقی‌مانده بود متصل نمودیم (شکل ۹). در این آزمایش شار شناوری  $1.28 \times 10^{-8} m^4 s^{-3}$  است. تفاوت این آزمایش با آزمایش اول در توسعه مدهای بهنجار از بالای ظرف و استهلاک آن به طرف کف ظرف است. با توجه به اینکه پلوم آب شیرین استفاده شده است، پلوم در قسمت فوقانی گسترش می‌یابد و با آزمایش وانگ و همکاران (۲۰۰۰) متفاوت است.

موج مشاهده شده) برحسب  $\lambda_2$  (طول موج محاسبه شده) رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که اختلاف مشاهده و محاسبه بسیار کم است.



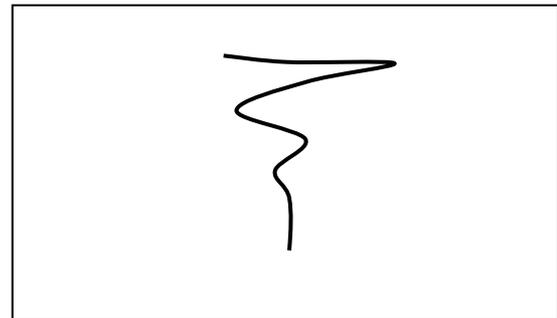
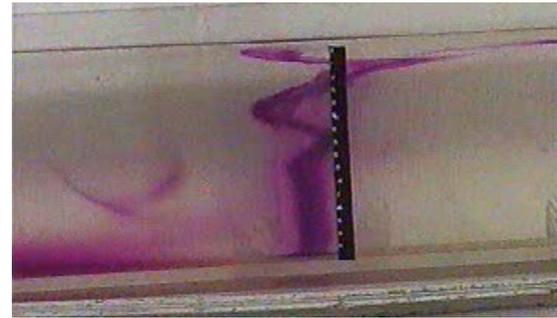
شکل ۱۲: طول موج مشاهده شده برحسب طول موج محاسبه شده.



شکل ۱۳: طول موج بی‌بعد شده برحسب عدد رینولدز.

جدول ۱: خلاصه‌ای از آزمایشها و نتایج آنها (در محیط آزمایشگاه).

شماره	تاریخ	مد نرمال	شارشناوری $F (m^4 s^{-3})$	$u$ (cm/s)	$N$ ( $s^{-1}$ )	Re	$\gamma$	$H$ (m)	$\lambda_1$ (m)	$\lambda_2$ (m)	$m(1)$ $m^{-1}$	$m(0)$ $m^{-1}$
۱	۸۰/۱۰/۹	۵	4.60 E-07	0.106	2.38 E-01	6872.0	61.14	0.08	4.80 E-02	4.72 E-02	1.31 E+02	132.98
۲	۸۰/۱۰/۱۰	۵	1.28 E-08	0.1	4.22 E-01	12182.6	297.83	0.057	2.80 E-02	2.84 E-02	2.24 E+02	221.11
۳	۸۰/۱۰/۱۵	۷	3.80 E-08	0.06	6.06 E-01	17509.2	432.16	0.05	2.33 E-02	2.33 E-02	2.70 E+02	269.13
۴	۸۰/۱۰/۲۵	۳	1.15 E-08	0.058	4.07 E-01	11755.4	112.95	0.067	3.60 E-02	3.62 E-02	1.75 E+02	173.50
۵	۸۰/۱۱/۰۱	۳	1.16 E-08	0.071	4.08 E-01	11789.4	107.76	0.068	3.64 E-02	3.70 E-02	1.73 E+02	169.69
۶	۸۰/۱۱/۰۲	۴	1.46 E-07	0.054	9.49 E-01	27423.5	2116.9	0.04	1.40 E-02	1.67 E-02	4.49 E+02	376.13
۷	۸۰/۱۱/۰۷	۳	1.22 E-06	0.04	3.04 E-01	8772.3	65.42	0.077	4.44 E-02	4.46 E-02	1.42 E+02	140.83
۸	۸۰/۱۱/۰۷	۳	1.22 E-06	0.236	3.04 E-01	8772.3	37.87	0.077	5.09 E-02	4.46 E-02	1.23 E+02	140.83



شکل ۱۱: شبیه‌سازی امواج داخلی در "مخزن در حال پرشدن" به کمک وزش باد.

## بحث نتایج

با استفاده از جدول (۱) می‌توان نتایج آزمایشگاهی زیر را بدست آورد، به عنوان مثال در شکل (۱۲)،  $\lambda_1$  (طول

۱- پلوم آب شور با زاویه ۹۰ درجه به مخزن (f.b.)

۲- پلوم آب شیرین با زاویه ۹۰ درجه به مخزن (f.b.)

۳- پلوم آب شیرین با زاویه ۴۰ درجه به مخزن (f.b.)

۴- پلوم آب شیرین با زاویه ۴۵ درجه به مخزن بصورت خطی پر شده

۵- پلوم آب شیرین با زاویه ۹۰ درجه به مخزن بصورت خطی پر شده

۶- پلوم آب شیرین با زاویه ۹۰ درجه به مخزن کاملاً چهار لایه‌ای

۷- پلوم آب شور با زاویه ۹۰ درجه به مخزن کاملاً پنج لایه‌ای

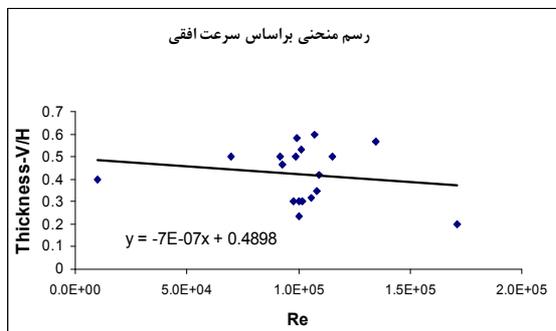
۸- همان آزمایش بالا با ¼ طول ظرف فاصله از پلوم آب شور

در جدول فوق  $N$  فرکانس شناوری،  $Re$  عدد رینولدز،  $\gamma$  ضریب استهلاک،  $H$  ارتفاع نفوذ پلوم به داخل مخزن،  $\lambda_1$  طول موج از طریق مشاهده،  $\lambda_2$  طول موج از طریق محاسبه،  $m(1)$  عدد موج از طریق مشاهده و  $m(0)$  عدد موج از طریق محاسبه می‌باشد.

جدول ۲: خلاصه‌ای از اندازه‌گیریها و نتایج آن در خلیج فارس (۲۹ و ۳۰ ژوئن ۲۰۰۰).

زمان	طول موج محاسباتی براساس شوری (m)	طول موج دیدیدانی براساس شوری (m)	ضخامت لایه‌ها براساس سرعت افقی (m)	شار شناوری ( $m^3 s^{-3}$ )	سرعت افقی (cm/s)	فرکانس شناوری ( $s^{-1}$ )	عدد رینولدز	ضخامت براساس منحنی سرعت تقسیم بر عمق	عدد موج براساس منحنی شوری $m^{-1}$	ضریب استهلاک
19:30	1.19	1.18	15	127.9	4	1.28E-02	115401	0.5	5.325	449012
20:30	1.19	1.375	12.5	128.01	5	1.21E-02	109062	0.417	4.57	257698
21:30	1.19	1.14	10.5	128.08	2	1.20E-02	108351	0.35	5.512	548962
22:30	1.19	1.4	7	128.32	2.5	1.11E-02	100197	0.233	4.488	260992
23:30	1.19	1.25	9	128.3	5.3	1.11E-02	100341	0.3	5.027	410087
00:30	1.19	1.41	6	129.38	5.5	1.90E-02	171011	0.2	4.456	148626
01:30	1.19	1.69		128.32		1.12E-02	101061		3.718	121861
02:30	1.19	1.5	12	128.73	7.3	1.10E-03	9896	0.4	4.189	2005175
03:30	1.19	1.4	14	128.66	7.7	1.03E-02	92925	0.467	4.488	281417
04:30	1.19	1.25	15	128.52	5.9	1.09E-02	98519	0.5	5.027	417670
05:30	1.19	1	17.5	128.59	5.4	1.10E-02	99009	0.583	6.283	1014659
06:30	1.19	1.18	9	128.59	2.1	1.09E-02	97698	0.3	5.325	530374
07:30	1.19	1.56	15	128.38	5.9	7.76E-03	69831	0.5	4.028	242911
08:30	1.19	1	15	128.57	7.8	1.02E-02	91971	0.5	6.283	1092304
09:30	1.19	0.94	9	128.44	11.1	1.13E-02	101597	0.3	6.684	1266488
10:30	1.19	1.29	9.5	128.26	9.1	1.18E-02	105934	0.317	4.871	342454
11:30	1.19	1.26	18	128.4	5.9	1.19E-02	107443	0.6	4.987	370967
12:30	1.19	1.2	16	128.41	8.2	1.12E-02	101070	0.533	5.236	479344
13:30	1.19	1.53		128.45	9.6	1.27E-02	114053		4.107	160739
14:30	1.19	1.08	17	128.47	5.6	1.50E-02	134734	0.567	5.818	548054
15:30	1.19	1.25		128.51		1.43E-02	128341		5.027	320620

ضریب استهلاک در جدول (۲) در مقایسه با اقیانوس‌ها و دریاهای آزاد قدری بزرگ است که احتمالاً به دلیل کم‌عمق بودن خلیج فارس نسبت به دریاهای دیگر است. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ضخامت بدون بعد شده را نسبت به عدد رینولدز نشان می‌دهند.

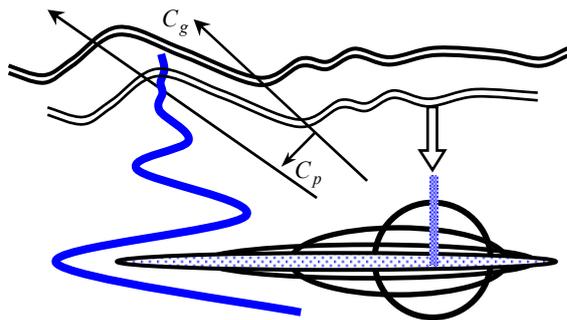


شکل ۱۴: ضخامت بی‌بعد شده برحسب عدد رینولدز بر اساس سرعت افقی.

همچنین در آزمایشگاه ضخامت لایه‌ها از مرتبهٔ سانتی‌متر (مثلاً ۴ سانتی‌متر) است و مدهای بهنجار تشکیل شده ۲ تا ۶ می‌باشد. شکل (۱۳) طول موج بدون بعد شده را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد که نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز طول موج بدون بعد کاهش می‌یابد. در جدول (۱) مشاهده می‌شود که ارتباط خاصی بین  $\lambda$  و عدد رینولدز وجود ندارد، که احتمالاً به دلیل آزمایش‌های متفاوت از یکدیگر می‌باشد. البته در صورتیکه ضریب استهلاک و طول موج به هم وابستگی داشته باشند، به تحقیق گسترده‌تر و آزمایش‌های بیشتری احتیاج است که فقط یک پارامتر تغییر نماید و بقیه عوامل ثابت باشند و هم‌اکنون در دست انجام است.

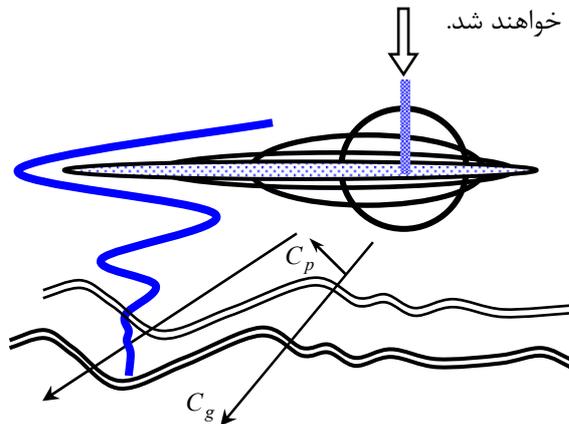
جدول (۲) خلاصه‌ای از اندازه‌گیریها و محاسبات و نتایج آنها را در خلیج فارس نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات این جدول ضخامت لایه‌ها با استفاده از منحنی شوری حدود ۱ تا ۲ متر برآورد می‌شود و بر اساس سرعت افقی بین ۵ تا ۱۰ متر استنباط می‌شود.

در هنگامی که پلوم آب شیرین به آب شور وارد می‌شود (در آزمایشگاه و همچنین ورود رودخانه به دریا) انرژی بتدریج از سطح به کف منتقل شده و ایجاد امواج داخلی را می‌نماید. به عبارت دیگر انرژی پلوم آب شیرین صرف ایجاد امواج داخلی در داخل شاره می‌شود. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) بطور شماتیک نحوه انتشار امواج داخلی به ترتیب در زمانی که منشاء انرژی در نزدیک کف و در نزدیک سطح واقع شده است را نشان می‌دهد.



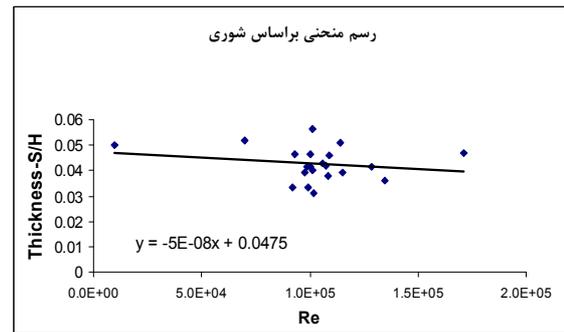
شکل ۱۶: نمایی از ایجاد امواج داخلی در محیط آزمایشگاه به کمک پلوم آب شور - خط تیره نشان دهنده ساختار مدهای بهنجار ایجاد شده توسط امواج داخلی است.

مدهای بهنجار امواج داخلی (فرکانس پایین) که توسط پلوم تلاطمی در محیط با لایه‌های چینشی تولید می‌شوند در نهایت منجر به لایه‌بندی کامل محیط خواهند شد.



شکل ۱۷: نمایی از ایجاد امواج داخلی در محیط آزمایشگاه به کمک پلوم آب شیرین مشابه امواج داخلی در محیط واقعی توسط پلوم آب شیرین رودخانه - خط تیره نشان دهنده ساختار مدهای بهنجار ایجاد شده توسط امواج داخلی است.

در گذشته اطلاعات اندکی در مورد مشاهده ساختار قائم مدهای بهنجار امواج داخلی وجود داشت و شکل‌های ساختار قائم این مدها در محیط‌های دریایی شناخته شده



شکل ۱۵: ضخامت بی بعد شده برحسب عدد رینولدز بر اساس شوری.

تعداد لایه‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های ۲۱ گانه خلیج فارس تعیین شده‌است و در هر قسمت مشخص نموده‌ایم و حدوداً از ۳ تا ۸ متغیر است. ساختار لایه‌ای نیز عمدتاً در قسمت فوقانی ستون آب مشاهده می‌شود که به دلیل پلوم رودخانه ورودی به منطقه اندازه‌گیری می‌باشد. پایداری ستون آب بویژه در قسمت میانی به دلیل بزرگی عدد ریچاردسون ( $Ri$ ) (معمولاً حدود ۵) است.

اگر محاسبات را در خلیج فارس به منظور تعیین طول موج ( $\lambda$ ) با استفاده از رابطه (۲۶) و با پهنای کانال تقریبی  $B = 12-15 \text{ km}$  (با توجه به تصاویر ماهواره‌ای و تخمین تقریبی پهنای پلومی که از رودخانه‌ها وارد منطقه شمال غربی خلیج فارس می‌شود) انجام دهیم و حاصل را با شکل‌های رسم شده از اندازه‌گیری‌های شمال غربی خلیج فارس مقایسه نماییم، نتایج تقریباً مناسبی بدست می‌آید که دلالت بر کاربرد مدل وانگ و همکاران حتی در محیط واقعی دارد. طول موج ( $\lambda$ ) حدود یک تا دو متر برآورد شده است.

در شمال غربی خلیج فارس عامل اصلی ایجاد امواج داخلی ورود پلوم آبهای شیرین (رودخانه‌ها) و عامل دوم وزش باد در نظر گرفته می‌شود. البته این امر در قسمتهای دیگر خلیج فارس هم می‌تواند رخ دهد که نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

در هر صورت در حل عددی و همچنین رسم منحنی‌های نشان داده شده از اندازه‌گیری در ناحیه شمال غربی خلیج فارس هر دو عامل (ورود پلوم آب رودخانه و اثر تنش باد) دخیل هستند و تقریباً عوامل اصلی ایجاد مدهای بهنجار امواج داخلی در نظر گرفته شده‌اند.

(محیط نیمه بسته و کم عمق دریائی) طراحی گردید و در نهایت به کمک پلوم آب شیرین (عامل انرژی) در "مخزن درحال پرشدن" مدهای بهنجار امواج داخلی ایجاد و مشاهده شد (مشابه ورود رودخانه به دریا) و پارامترهای مربوطه اندازه‌گیری و با داده‌های میدانی مقایسه گردید (درقسمت میدانی و عددی این تحقیق عامل انرژی بخصوص پلوم آب شیرین رودخانه ویا رودخانه و باد هر دو با هم است).

دراینجا ممکن است بتوان تحقیقات لوتن و سوولو (شکل ۱۸) را به ایجاد امواج داخلی در اقیانوس هند (محیط باز و عمیق دریایی) در اثر تنش شدید باد (به عنوان عامل انرژی) نسبت داد.

### نتیجه گیری

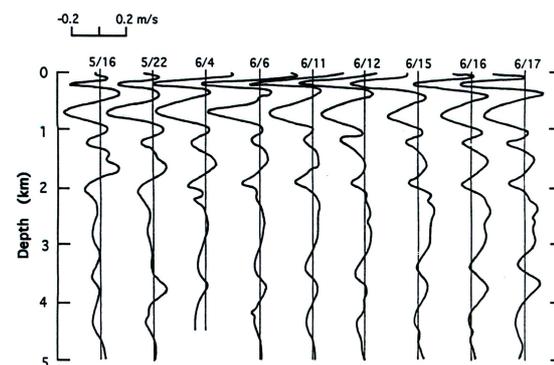
تشکیل مدهای بهنجار امواج داخلی و گسترش آنها در محیط آزمایشگاه و محیط واقعی (اندازه‌گیری میدانی- محاسبات عددی بوسیله حل معادله موج داخلی) همپوشانی و تطابق خوبی را نشان می‌دهند. همچنین همواره برای تشکیل امواج داخلی محیط چینه‌بندی و یک عامل مولد انرژی (پلوم تلاطمی و یا رودخانه ویا تنش باد) لازم است که در نهایت پس از تولید امواج داخلی به ساختار لایه‌ای کامل در محیط منجر خواهد شد.

درتشکیل امواج داخلی در آزمایشگاه پلوم آب شور موجب تشکیل مدهای بهنجار از کف مخزن می‌شود و در گسترش آن به طرف بالا گرانیروی موجب استهلاک آنها خواهدشد در صورتیکه پلوم آب شیرین موجب تشکیل مدهای بهنجار از سطح آب مخزن می‌شود و نیز در گسترش آن به طرف پایین گرانیروی موجب استهلاک آنها می‌شود.

پلوم آب شیرین با زاویه ۴۰ درجه و کمتر نسبت به سطح مایع داخل مخزن در مقایسه با زاویه ۹۰ درجه، موجب سرعت افقی بزرگتر در ساختار مدهای بهنجار امواج داخلی در محیط آزمایشگاه می‌شود.

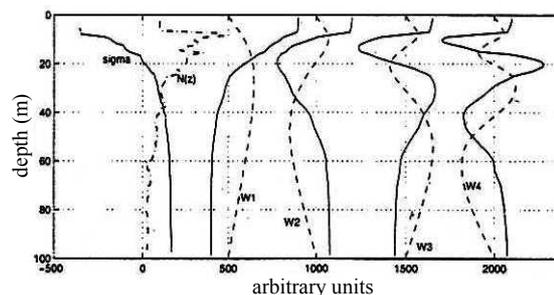
ضخامت لایه‌ها با استفاده از منحنی سرعت افقی در محیط آزمایشگاه حدوداً ۵ سانتی‌متر و کمتر برآورد می‌شود. ضخامت لایه‌ها با استفاده از منحنی توزیع قائم سرعت افقی در محیط واقعی (خلیج فارس) حدوداً بین ۵ الی ۱۰ متر برآورد می‌شود. ضخامت لایه‌ها با استفاده از

نبود. به عنوان مثال لوتن و سوولو (۱۹۷۶) [۱۷] به ماهیت امواج ایجادشده در اقیانوس هند به دیده شک و تردید و به عنوان پدیده‌ای پیچیده در امتداد استوا نگاه می‌کردند (شکل ۱۸). بعدها بوهرر (۲۰۰۰) [۴] در تحقیقات خود در دریاچه‌های آلمان (محیط بسته دریایی) همراه با شبیه‌سازی عددی وجود مدهای بهنجار امواج داخلی (با عامل انرژی باد) را نشان داد (شکل ۱۹).



شکل ۱۸: مؤلفه‌های شرق سو سرعت در ( $0^\circ, 53^\circ E$ ) اقیانوس هند و در بازه زمانی (۱۶ می الی ۱۷ جون). محور قائم عمق را برحسب کیلومتر نشان می‌دهد. (*Deep-Sea Res., 23 1976*).

همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۰) با شبیه‌سازی امواج داخلی در "مخزن درحال پرشدن" (محیط بسته آزمایشگاهی) به کمک پلوم آب شور (عامل انرژی) مدهای بهنجار امواج داخلی را مشاهده نمودند.



شکل ۱۹: مدل عددی بوهرر که نیمرخ  $w$  سرعت قائم (خط چین) و  $u$  سرعت افقی (خط پر) برای پنج مد مختلف،  $N$  فرکانس شناوری و چگالی ( $\sigma T$ ) را نشان می‌دهد.

در این تحقیق ابتداء نمودارهای امواج داخلی با استفاده از داده‌های واقعی رسم و سپس حل عددی ساختار قائم مدهای بهنجار این امواج در خلیج فارس

به طور موضعی (محلی) در قسمتهایی از نیمرخ‌های زیگماتی ستون آب ناپایداری استاتیکی (ایستایی) مشاهده می‌شود که این نشانگر جریانهای غیرهمچگالی است. شبیه‌سازی مدهای بهنجار امواج داخلی در "مخزن درحال پرشدن" بوسیله وزش باد به علت ایجاد امواج ساکن و برهم خوردن مدل دو بعدی از دقت کافی برخوردار نیست ولی از لحاظ کیفی و شبیه‌سازی پدیده قابل توجه است.

تحقیقات مشابه دیگری در منطقه ورودی تنگه هرمز به خلیج فارس برای ایجاد امواج داخلی پیشنهاد می‌شود (ورود آب نسبتاً شیرین‌تر اقیانوس هند به آب نسبتاً شورتر خلیج فارس در اثر کشند) و نیز تحقیقات مشابه دیگری در منطقه خروجی تنگه هرمز به اقیانوس هند برای ایجاد امواج داخلی پیشنهاد می‌شود (ورود آب نسبتاً شورتر خلیج فارس به آب نسبتاً شیرین‌تر اقیانوس هند در اثر کشند). البته با توجه به اینکه دریای عمان و اقیانوس هند محیط بسته به حساب نمی‌آیند به تحقیقات بیشتری در این مورد احتیاج است.

نقش همرفت پخش دوگانه نیز می‌تواند در ایجاد ساختارهای لایه‌ای مؤثر باشد که خود لازم به مطالعه جداگانه دارد.

منحنی شوری در محیط واقعی (خلیج فارس) حدوداً ۲ متر برآورد می‌شود (همانطور که قبلاً ذکر شد، داده‌های سرعت افقی تنها در پنج نقطه در جهت قائم اندازه‌گیری شده و مانند سایر پارامترها دارای تفکیک خیلی خوبی در جهت قائم نیست).

عامل انرژی تنش باد نیز در تشکیل امواج داخلی به خصوص در مناطق دریایی و اقیانوسی که در مجاورت ورودی رودخانه‌ها واقع نیستند با اهمیت است، ولی در مناطق مجاور رودخانه‌ها به علت بزرگتر بودن اندازه حرکت ورودی آب نسبت به هوا خیلی مهمتر است. همچنین ساختار لایه‌ای عمدتاً در قسمت فوقانی ستون آب مشاهده می‌شود که احتمالاً پلوم رودخانه ورودی به خلیج فارس در ایجاد آن نقش عمده را داراست. تعداد لایه‌ها از ۳ تا ۸ متغیر است و ضخامت آنها بطور متوسط حدود ۲ متر می‌باشد.

در قسمت نزدیک کف یک لایه نسبتاً آمیخته بویژه در نیمرخ دما مشاهده می‌شود که به احتمال زیاد مربوط به اختلاط شدید جزر و مدی (کشندی) در نزدیک کف است.

در عمده قسمتهای ستون آب بویژه در قسمت میانی عدد ریچاردسون ( $Ri$ ) معمولاً خیلی بیشتر از ۱ (معمولاً حدود ۵) است که نشانگر پایداری ستون آب است.

## مراجع

- 1 - Robert, J. (1975). *Internal Gravity Waves in the Ocean*, Dekker.
- 2 - Gill, A. G. (1982). *Atmospheric-Ocean dynamics*, A. P.
- 3 - Fedrov, F. N., (1978). *The Thermohaline Fine Structure of the Ocean*, Translated by D. A. Brown, Ed. J. S. Turner, Vol2, Program on Marine Series.
- 4 - Boehrer B., (December 15, 2000). "Modal response of a deep stratified lake: western Lake Constance." *J. Geophysical research*. Vol. 105, No. c12PP. 28.837-28.845.
- 5 - Wong, A. B. D., Griffiths, R. W. and Hughes, G. O., (2001). "Shear layers driven by turbulent plumes." *J. Fluid Mech.*, Vol.434, PP. 209-244.
- 6 - Morton, B. R., Taylor, G. I. and Turner, J. S. (1956). "Turbulent gravitational convection from, maintained and instantaneous sources." *Proc. R. Soc. Lond.*, A. 234, PP. 1-23.
- 7 - Baines, W. D. and Turner, I. S. (1969). "Turbulent buoyant convection from a source in a confined region." *J. Fluid Mech.*, Vol.37 PP. 54-80.
- 8 - Manins, P. C. (1979). "Turbulent buoyant convection from a source in a confined region." *J. Fluid Mech.*, Vol. 91, PP. 765-781.

- 9 - Germeles, A. E. (1975). "Forced plumes and mixing of liquids in tanks." *J. Fluid Mech.*, Vol. 71, Part 3, PP. 601-623.
- 10 - Worster, M. G. and Huppert, H. E. (1982). "Time-dependent density profiles in a filling box." *J. Fluid Mech.*, Vol. 132, PP. 457-466.
- 11 - Killworth, P. D. (1977). "Mixing on the Weddell Sea continental slope." *Deep-Sea Res.*, Vol. 24, PP. 427-448.
- 12 - Killworth, P. D. and Turner, J. S. (1982). "Plumes with time-varying buoyancy in a confined region." *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, Vol. 20 PP. 265-291.
- 13 - Cooper, P. and Linden, P. F. (1996). "Natural ventilation of an enclosure containing two buoyancy sources." *J. Fluid Mech.*, Vol. 311, PP. 153-176.
- 14 - Manins, P. C. (1976). "Intrusion into a stratified fluid." *J. Fluid Mech.*, Vol. 74 PP. 547-560.
- 15 - Bretherton, F. P. (1976). "The time-dependent motion due to a cylinder moving in an unbounded rotating or stratified." *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, PP. 545-570.
- 16 - Roberts, J. (1973). *Internal Gravity waves in the Ocean*, Vol. 2, Printed in the U.S.A.
- 17 - Lutten and Swallow, (1976). "Mesoscale studies in the Indian Ocean using altimeter data." *Deep-Sea Res.*, Vol. 23.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 
- 1 - Runge-Kutta
  - 2 - double Diffusive Convection
  - 3 - Taylor Entrainment
  - 4 - Filling Box
  - 5 - Magma
  - 6 - Separation Constant
  - 7 - Kinematic Viscosity
  - 8 - Aspect ratio
  - 9 - Upwelling
  - 10 Non Isopycnal