

## مطالعه آزمایشگاهی امواج درونی ناشی از حرکت یک جسم استوانه‌ای در یک شاره چینه‌بندی شده

محمد اکبر نژاد بایی<sup>۱</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۲\*</sup>، محمد اکبری نسب<sup>۳</sup>، مجتبی عظام<sup>۴</sup> و سارا اله یاری بیک<sup>۵</sup>

m\_61b@yahoo.com

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

bidokhti@ut.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استاد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران

m.akbarinasab@umz.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه مازندران، بابل

ezam@srbiau.ir

<sup>۴</sup> استادیار، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

s.allahyari@srbiau.ir

<sup>۵</sup> استادیار، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱

### چکیده

یکی از پدیده‌هایی که در محیط چینه‌بندی اقیانوس و حضور یک نیروی خارجی رخ می‌دهد، امواج درونی است. این مطالعه به منظور بررسی آزمایشگاهی و یک پشت یک جسم استوانه‌ای در محیطی با چینه‌بندی خطی انجام شده است. در محیط آزمایشگاهی در یک تانک شیشه‌ای به ابعاد  $1 \times 0.5 \times 3$  متر به کمک روش خطی با فرکانس شناوری  $0.5/1$  بر ثانیه چینه‌بندی صورت گرفت. در این محیط با استفاده از یک ارابه که حرکت آن به وسیله برنامه رایانه‌ای کنترل می‌شود، یک جسم استوانه‌ای با قطر  $6$  سانتی‌متر و پهنای  $45$  سانتی‌متر، برای بررسی تغییر در اعداد فرود و رینولدز محیط و تأثیر این تغییرات بر شکل‌گیری امواج درونی پشت استوانه، با سرعت‌های  $5$  میلی‌متر بر ثانیه تا  $4/5$  سانتی‌متر بر ثانیه حرکت داده شد. با استفاده از روش تصویربرداری از سایه از این محیط تصویربرداری شد. نتایج حضور امواج درونی را با وابستگی به تغییرات فرکانس شناوری محیط ( $N$ )، عدد فرود و عدد رینولدز نشان داد. همچنین مشخص شد که با افزایش عدد فرود تا عدد فرود بحرانی، فعالیت امواج درونی و طول موج آن‌ها بیشتر شده است. در محدوده عدد فرود فوق بحرانی نیز که با تلاطم محیط همراه است، امواج بلند به نسبت منظم و امواج کوتاه‌تر نامنظم دیده شد.

واژه‌های کلیدی: محیط چینه‌بندی شده، امواج درونی، فرکانس شناوری، روش تصویربرداری از سایه، عدد فرود

### ۱. مقدمه

می‌سازند، ولی پارامترهای هیدروفیزیک محیط که در حین حرکت این اجسام تغییر می‌کنند قابل کنترل نیستند. استفاده از تغییرات پارامترهای هیدروفیزیک در حین حرکت اجسام زیرسطحی می‌تواند در شناسایی آن‌ها بسیار مفید باشد و یکی از مهم‌ترین این پارامترها، امواج درونی و دنباله تلاطمی است. نخستین بار به وسیله اکمن در سال ۱۹۰۴، امواج درونی که به واسطه حرکت کشتی ایجاد شده بود، شناسایی شد [۱]. شوترلند، آگویلار، گلاشکو و بیدختی هر یک به روش‌های

امروزه مطالعه امواج درونی با توجه به اهمیت آن برای کاربردهای مختلفی چون برآورد انتقال انرژی و ردیابی، یکی از مطالعات پایه در اقیانوس‌شناسی و سیالات است. از این امواج به عنوان عوامل ایجاد ساختارهای لایه‌ای در محیط‌های دریایی نام برده می‌شود. یکی دیگر از کارکردهای مهم این امواج، انتقال انرژی در راستای قائم است. برای کاربرد ردیابی این امواج نیز باید گفت، اغلب در طراحی اجسام زیرآبی در مقابل امواج صوتی و تا حدی الکترومغناطیسی غیرقابل آشکار

حرکت جسم را در این حالت مشاهده نمودند [۱۴]. آن‌ها نشان دادند جریان یادشده در اعداد فرود بسیار کوچک که اثر گرانروی زیاد بوده و اغتشاش مربوط به جسم نیز در جلو جسم قابل ملاحظه است به وقوع می‌پیوندد.

هدف اصلی این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی و یک پشت استوانه با سرعت‌های مختلف در یک محیط چینه‌بندی شده خطی است.

## ۲. مبانی نظری

با استفاده از نظریه خطی گیل، می‌توان رابطه واپاشی حرکت امواج درونی را در یک شاره چینه‌بندی شده به صورت زیر نشان داد [۱۵]:

$$\omega^2 = N^2 \left( \frac{K_h}{K} \right)^2 = N^2 \cos^2 \theta \quad (1)$$

که  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای موج،  $N$  فرکانس شناوری محیط  $K_h = (K_x, K_y)$ ،  $\left[ \left( -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{1/2} \right]$  عدد موج افقی و  $K = (K_x, K_y, K_z)$  بردار عدد موج و  $\theta$  زاویه بین بردار عدد موج و راستای افقی است.

هنگامی که جسمی با سرعت متوسط  $U$  در یک شاره چینه‌بندی شده با فرکانس شناوری  $N$  حرکت می‌کند، طول موج امواج  $\lambda = \frac{U}{N} = 2\pi$  است. عدد فرود جریان با  $h$  (ضخامت جسم در راستای قائم) عبارت است از:

$$Fr = \frac{U}{Nh} = \frac{\lambda}{2\pi h} \quad \text{or} \quad \lambda = 2\pi \cdot h \cdot Fr \quad (2)$$

جریان دنباله به عدد رینولدز وابسته است

$$R = \frac{UD}{v} \quad (3)$$

که  $U$  سرعت جسم زیر آب،  $D$  طول جسم مشخصه برای نمونه قطر سیلندر یا کره یا طول جسم در راستای افق و  $v$  ضریب ویسکوزیته کنماتیکی شاره است.

این نشان می‌دهد که طول موج امواج ایجادشده (نرمال شده با  $h$ ) به طور مستقیم با فرود متناسب است، هنگامی که امواج درونی در جریان قابل ملاحظه است.

نتایج آزمایشگاهی هاپفینگر و همکاران برای یک جسم

مختلفی با ساخت کانال آب شیشه‌ای دارای ابعاد مختلف امواج درونی را ایجاد کرده و ویژگی‌های فیزیکی امواج ایجادشده را اندازه‌گیری نموده و مورد بررسی و مطالعه قرار دادند [۲-۵].

مقاله‌ها و مطالعه‌های مختلفی برای بررسی امواج درونی و یک تلاطمی در شاره‌هایی با چینه‌بندی پیوسته، پله‌ای و ... صورت گرفته است. ثورب آزمایشی را انجام داد که در آن امواج درونی، اختلاط و دنباله تلاطمی در شاره‌های چینه‌بندی شده در اثر حرکت اجسام دیده می‌شود [۶]. گارت و مانک نتیجه گرفتند در محیطی با چینه‌بندی چگالی مانند ترموکلاین اقیانوس حرکت اجسامی مثل زیردریایی می‌تواند امواج درونی تولید کند که تا فاصله زیادی انتشار می‌یابد [۷]. دتسکر و وساوسکین نیز به بررسی امواج یک جسم در یک شاره چینه‌بندی شده به صورت دوبعدی پرداختند و دریافتند که برهم‌کنش امواج ناشی از حرکت جسم، امواج درونی با دامنه بزرگ در اقیانوس ایجاد می‌کند [۸]. به عنوان نمونه دیگر می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی استیوستون و همکاران اشاره کرد که در آن جسمی استوانه‌ای را در یک شاره چینه‌بندی شده حرکت دادند و امواج درونی ناشی از این حرکت را مشاهده نمودند [۹]. همچنین می‌توان از آزمایش اسوین نام برد که در آن روش‌های آشکارسازی اجسام زیرآبی را بررسی نموده و دنباله تلاطمی و امواج درونی ناشی از حرکت اجسام زیرسطحی را با روش‌های اپتوالکتریکی شناسایی کرده است [۱۰]. عبدالغنی و دیامیس اثرات غیرخطی امواج درونی که از دنباله‌های تلاطمی شکل می‌گیرد را بررسی نموده‌اند [۱۱]. اوهایو و همکاران دنباله حرکت یک جسم استوانه‌ای را در یک شاره چینه‌بندی شده بررسی کرده و اعلام نمودند که فرکانس جدایش تاوه‌ها از جسم و حالت دوبعدی آن‌ها با افزایش چینه‌بندی چگالی تغییر می‌کند [۱۲]. وانگ و گرفتیت نیز حضور جریان‌های برشی همراه میدان جریان امواج درونی را در آزمایشگاه ناشی از حرکت یک پلوم به دست آوردند [۱۳]. متکین و چسکین جریان حول استوانه در حال حرکت درون شاره‌ای با چینه‌بندی پیوسته چگالی را بررسی نموده و جریان‌های مربوط به امواج درونی ناشی از

انجام شده است. این تانک شیشه‌ای با استفاده از روش دو تانکر ۷۵۰ لیتری با هدایت‌های الکتریکی متفاوت شور (۵۰ میلی‌زیمنس) و شیرین لایه‌بندی می‌شود. سطح آب دو مخزن به یک میزان پر شده است. ابتدا دریچه مخزن آب شور را باز نموده و با استفاده از یک شیلنگ که بر سر خروجی آن به درون کانال اسفنجی قرار داده شده است، آب شور را به داخل تانک آزمایش جاری می‌کنیم، سپس بلافاصله دریچه بین دو مخزن را باز می‌نماییم. ورود و آنگیری کانال با آب شور باید بسیار آرام صورت گیرد به طوری که موجب برهم خوردگی و درهم آمیختگی لایه‌ها نشود. زمانی حدود ۴ ساعت صرف می‌شود که تانک آزمایش تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر آب‌گیری شود. همان‌طور که از نحوه آب‌گیری و ایجاد شاره چینه‌بندی شده با چگالی پیوسته مشخص است، هنگامی که آب شور مخزن شماره ۲ در حال تخلیه در تانک آزمایش است، آب شیرین مخزن شماره ۱ جای آب شور را در مخزن شماره ۲ پر می‌کند؛ زیرا همان‌طور که در بالا گفته شد سطح سیال در دو مخزن ۱ و ۲ هم‌سطح می‌باشد. آب شیرین با وارد شدن به مخزن شماره ۲، غلظت شوری آن را رقیق نموده و در کانال شاره‌ای چینه‌بندی شده با چگالی پیوسته خطی خواهیم داشت. فرکانس شناوری (N) بر اساس گرادیان متوسط نیم‌رخ قائم چگالی در این آزمایش‌ها ۰/۵۱ بر ثانیه است.

### ۳-۲. طراحی جسم استوانه‌ای و ارابه برای حرکت جسم

به منظور بررسی امواج درونی و ویک پشت جسم، از یک استوانه به قطر ۶ سانتی‌متر و پهنای ۴۵ سانتی‌متر استفاده شد. این جسم استوانه‌ای با یک برنامه رایانه‌ای کنترل می‌شود و به وسیله یک ارابه متصل به برنامه رایانه‌ای این جسم در محدوده ۰/۵ تا ۴/۵ سانتی‌متر بر ثانیه حرکت داده می‌شود. برای نمونه‌گیری و تصویربرداری از ویک‌های ایجاد شده و امواج درونی ناشی از حرکت جسم، از روش نوری معروف به شادوگرافی<sup>۲</sup> استفاده شد.

با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی جسم و جریان می‌توان رژیم‌های مختلف جریان با توجه به امواج درونی ایجاد شده

کروی نشان می‌دهد که دامنه تغییرات فرود همراه با امواج درونی ۰/۵ تا ۴ است و پس از آن دنباله تلاطمی حاکم می‌شود که همراه با تلاطم و امواج نامنظم با طول موج خیلی کوچک‌تر است [۱۶].

برای امواج درونی ساکن نسبت به جسم در حال حرکت در یک شاره چینه‌بندی شده با ضخامت به نسبت کم  $H$ ، با توجه به شرایط مرزی کف و سطح (تقریب مرز سخت) می‌توان نشان داد که ساختار موج دارای ساختار مدی است (معروف به مدهای نرمال، گیل [۱۵]) و ساختار آن با رابطه زیر ارائه می‌شود (اوها و همکاران [۱۲]):

$$\frac{NH}{\pi U} = \left( n^2 - k_x^2 \frac{H^2}{\pi} \right)^{1/2} \quad (4)$$

که در آن  $H$  عمق شاره و  $\frac{2H}{n}$  طول موج مد  $n$  حرکت است. آن‌ها همین‌طور نشان دادند که برای موج ایستا نسبت به جسم با عدد موج افقی در راستای حرکت  $k_x \rightarrow 0$  داریم:

$$\frac{NH}{\pi U} = n$$

بنابراین طول موج این امواج در پشت جسم عبارت است از:

$$\lambda = \frac{2^{1/2} H}{\left[ \left( \frac{NH}{\pi U} \right)^2 - n^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

که مشابه رابطه (۲) است، ولی ساختار موج در راستای قائم با  $H$  عمق شاره بی‌بعد شده است نه ضخامت جسم  $h$ ، برای مد  $n = 0$

$$\lambda = 2^{1/2} H \pi Fr \quad (6)$$

که  $Fr = (NH / U)^{-1}$  است؛ بنابراین می‌توان طول موج امواج درونی ایجاد شده را بر حسب عمق شاره (در صورت کم بودن نسبی به ضخامت جسم) یا ضخامت جسم (برعکس مورد قبلی) پارامتری کرد.

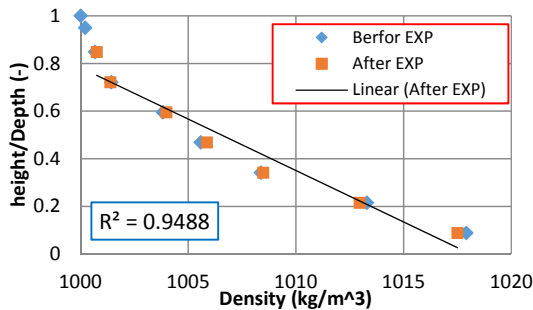
### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. لایه‌بندی خطی تانک

تمام آزمایش‌ها در یک تانک شیشه‌ای به ابعاد  $۳ \times ۱ \times ۰/۵$  متر

پس از چینه‌بندی کانال نسبت به اندازه گیری میزان فرکانس شناوری (N) محیط چینه‌بندی شده اقدام شده است که شکل ۲ روند تغییرات چگالی در راستای قائم (بی‌بعد شده با ارتفاع آب) را برای قبل و بعد آزمایش‌ها نشان می‌دهد. تغییر نیم‌رخ قائم چگالی بسیار اندک است، بسامد شناوری بر اساس گرادپان متوسط نیم‌رخ قائم چگالی در این آزمایش‌ها ۰/۵۱ بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

پس از انجام آزمایش‌ها این عدد برابر ۰/۵ اندازه‌گیری شده است. دامنه تغییرات عدد رینولدز نیز از ۳۰۰ تا حدود ۳۰۰۰ و عدد فرود نیز از حدود ۰/۱۶ تا ۱/۵ است.



شکل ۲. نیم‌رخ‌های قائم چگالی قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها

جدول ۱ شرایط آزمایش‌ها را با طول و ارتفاع امواج ایجاد شده به وسیله جسم در سرعت‌های مختلف، پس از پردازش تصویر و تحلیل فریم به فریم عکس‌ها و با توجه به اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد.

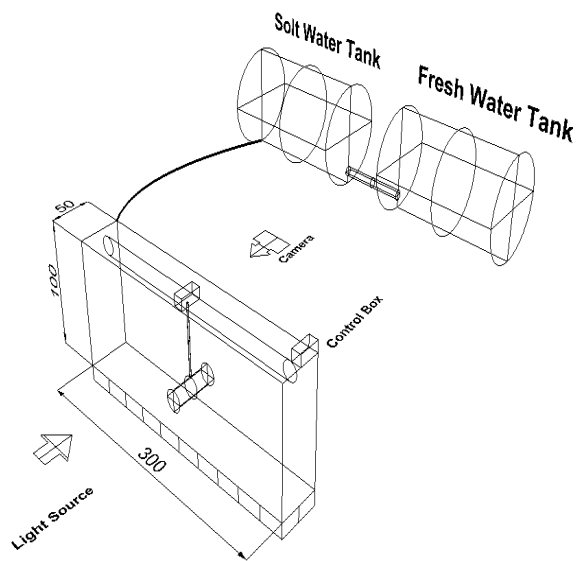
جدول ۱. خلاصه‌ای از شرایط آزمایش‌ها به همراه طول و ارتفاع

امواج درونی ایجاد شده (ابعاد بر حسب سانتی‌متر)

ارتفاع موج (آزمایشی)	طول موج (آزمایشی)	طول / ضخامت جسم	طول موج (تئوری)	عدد فرود	عدد رینولدز	سرعت (cm/sec)
۰/۷	۶/۹	۱	۶/۱۹	۰/۱۶	۳۰۰	۰/۵
۱/۱	۱۰	۱/۴	۸/۶۷	۰/۲۳	۴۲۰	۰/۷
۲	۱۵	۲/۱	۱۲/۳۹	۰/۳۳	۶۰۰	۱
۲/۶	۱۸	۳/۱	۱۸/۵۸	۰/۴۹	۹۰۰	۱/۵
۳	۲۳/۵	۴/۱	۲۴/۷۷	۰/۶۶	۱۲۰۰	۲
۱/۴	۳۵	۵/۲	۳۰/۹۷	۰/۸۲	۱۵۰۰	۲/۵
۹/۴	۳۹	۶/۲	۳۷/۱۶	۰/۹۹	۱۸۰۰	۳
۳/۶	۴۵	۷/۲	۴۳/۳۵	۱/۱۵	۲۱۰۰	۳/۵
trub	trub	۸/۳	۴۹/۵۵	۱/۳۲	۲۴۰۰	۴
trub	trub	۹/۳	۵۵/۷۴	۱/۴۸	۲۷۰۰	۴/۵

را بررسی کرد که هدف اصلی این مقاله است. ویژگی‌های امواج ناشی از حرکت جسم در شرایط مختلف از نتایج این مقاله است، این امر با استفاده از عکس‌های ثبت شده و تحلیل صحنه به صحنه جریان از روی ویدئوهای ثبت شده جریان در تانک مخصوص با چینه‌بندی چگالی صورت می‌گیرد، نیم‌رخ قائم چگالی را با یک شوری سنج دقیق<sup>۳</sup> به دست می‌آوریم.

مدل در امتداد مرکز تونل به حرکت در آورده می‌شود، حرکت مدل در راستای افقی با یک سیستم ارباب، ریل و موتور الکتریکی کنترل شده با رایانه صورت می‌گیرد و سرعت جسم کنترل می‌شود. در آزمایش‌ها از نیم‌رخ قائم چگالی خطی استفاده شده است. شکل ۱ نمایی شماتیک از کانال جریان، جسم استوانه‌ای درون آن، دوربین و منبع نور را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمای شماتیک کانال جریان با چینه‌بندی چگالی

و جسم استوانه‌ای در درون آن

چشمه نور از یک پروژکتور تشکیل شده که در فاصله زیاد از کانال، نوری تقریباً موازی را به کانال تابانده که از عرض آن عبور می‌نماید، می‌تاباند. این نور تصویری از سایه میدان جریان را که نشان‌دهنده امواج ناشی از حرکت مدل استوانه‌ای است روی کاغذ مات نازک چسبیده به بدنه شفاف کانال تشکیل می‌دهد. سایه میدان جریان با دوربین عکاسی و فیلم‌برداری ثبت می‌شود.

a)  $Fr = 0.164$



b)  $Fr = 0.33$



c)  $Fr = 0.66$



شکل ۳. میدان جریان پشت مدل استوانه‌ای وقتی جسم در حرکت است برای مقادیر عدد فرود ۰/۱۶ تا ۰/۶۶

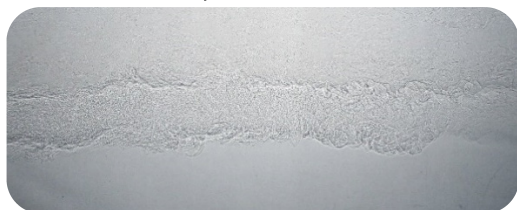
a)  $Fr = 0.99$



b)  $Fr = 1.15$



c)  $Fr = 1.32$



شکل ۴. میدان جریان پشت مدل استوانه‌ای برای مقادیر عدد فرود ۰/۹۹ تا ۱/۳۲ وقتی جسم در حرکت است.

در سرعت‌های ۴ و ۴/۵ سانتی‌متر بر ثانیه به دلیل وجود تلاطم زیاد در محیط، امواج درونی قابل مشاهده نیستند.

برای این که عکس‌های ثبت‌شده مورد تحلیل قرار گیرد در نرم‌افزار متلب کدی نوشته شده تا جزئیات تصاویر با دقت بیشتری نشان داده شده و مورد تحلیل واقع شود.

با توجه به عکس خروجی برنامه متلب و مقیاس‌گذاری صورت گرفته روی کانال، با استفاده از نرم‌افزار دیجیتالی‌زیت<sup>۴</sup> به محاسبه طول و ارتفاع امواج درونی در پشت جسم پرداخته شد که با روابط تئوری همبستگی خوبی دارد. قابل توجه است، هر آزمایش با سرعت ارائه شده در جدول ۱، حداقل ۲ بار تکرار شده است که نتایج در هر ۲ بار تقریباً یکسان هستند و پس از بررسی آزمایش‌ها در هر سرعت، میزان طول و ارتفاع امواج در جدول ۱ آورده شده است. علاوه بر این، در تمام مراحل انجام آزمایش‌ها، یک سیستم شوری سنج حساس به تغییرات چگالی با پاسخ سریع به کار گرفته شده که از تحلیل سیگنال‌های به دست آمده از آن برای بررسی اعتبار میزان فعالیت، طول و ارتفاع موج‌های درونی ردیابی شده، استفاده شده است. در بخش بعد نتایج مربوط به امواج ایجادشده بر اثر حرکت جسم ارائه می‌شود.

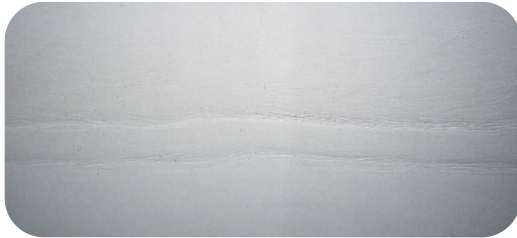
#### ۴. نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج آزمایش‌های مدل در حال حرکت در شاره چینه‌بندی شده با چگالی پیوسته می‌پردازیم، فرکانس شناوری شماره ۰/۵۱ بر ثانیه است و در طول آزمایش‌ها تغییرات بسیار اندکی داشته که قابل چشم‌پوشی است. شکل‌های ۳ و ۴، میدان جریان اطراف جسم در حال حرکت را برای مقادیر مختلف عدد فرود نشان می‌دهد، با افزایش عدد فرود میزان فعالیت امواج درونی افزایش یافته و طول امواج بلندتر می‌شود، البته از عدد فرود ۱/۳۲ به بعد محیط تلاطمی شده و امواج درونی قابل مشاهده نیستند (رژیم  $\langle \omega N \rangle$ ).

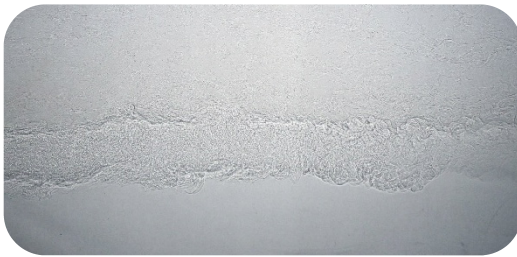
هنگامی که جسم با عدد فرود بیش از حد (بیش از ۱/۱۵) حرکت می‌کند، دنباله جسم تلاطمی شده و فعالیت امواج اصلی ناشی از حرکت جسم کاهش می‌یابد. دنباله جسم که تلاطمی است بعد از فاصله‌ای از پشت مدل به هم می‌ریزد، فیزیک یک محل متلاطم را در یک شاره چینه‌بندی شده به تصویر می‌کشد.

شکل ۶ جریان را در پشت جسم برای این حالت و حالتی که جریان بحرانی (عدد فرود ۱/۱۵) است را برای مقایسه نشان می‌دهد، انتشار امواج درونی از دنباله تلاطمی جسم نیز مشاهده می‌شود.

a)  $Fr = 1.15$



b)  $Fr = 1.32$



شکل ۶. میدان جریان پشت جسم برای حالت‌های بحرانی و فوق بحرانی

## ۵. نتیجه‌گیری

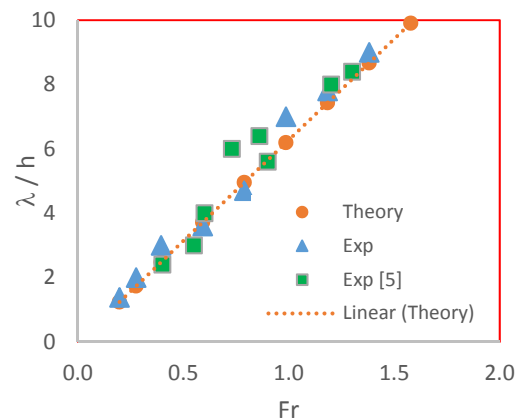
نتایج آزمایش‌های حرکت یک جسم استوانه‌ای در یک کانال با شاره چینه‌بندی شده نشان داد که می‌توان به رژیم‌های جریان در شرایط مختلف دست یافت. در آزمایش‌های حرکت جسم استوانه‌ای در شاره با چینه‌بندی پیوسته نشان داده شد که با افزایش عدد فرود و رینولدز جریان، طول موج افقی امواج پشت جسم، سطح و کف کانال همان‌طور که تئوری پیش‌بینی می‌کند افزایش می‌یابد. البته این حالت تا عدد فرود در حدود ۱/۱۵ مشاهده می‌شود. پس از آن یعنی برای جریان فوق بحرانی، در پشت جسم یک دنباله ظاهر شده که بعد از مدتی به هم می‌ریزد. از دنباله جسم

امواج درونی ایجاد شده برای اعداد فرود ۰/۲۳ به بعد کاملاً قابل ملاحظه‌اند و در نزدیک سطح، کف و پشت جسم دیده می‌شوند، طول این امواج با افزایش اعداد فرود افزایش می‌یابد، همین‌طور طول موج افقی موج درونی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد، فعالیت امواج درونی برای عدد فرود نزدیک به یک مشخص است.

شکل ۵ تغییرات طول موج افقی موج اصلی درونی ناشی از حرکت جسم را که با ضخامت جسم بی‌بعد شده است، برحسب عدد فرود نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج تئوری خطی (رابطه ۲) مقایسه شده و با آن هم‌خوانی خوبی دارد، از سوی دیگر با نتایج آزمایشگاهی مقاله بیدختی و همکار (که مشخصات بی‌بعد شده یکسانی با تحقیق حاضر دارد) مقایسه شد که رفتار مشابهی را نشان می‌دهد [۵].

یکی از هدف‌های مقاله پیش‌رو بررسی تأثیر میزان و تغییرات شوری بر پارامترهای امواج درونی است. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی صحت مدل تئوری را به اثبات رسانده

است و با توجه به رابطه شماره (۲)،  $\frac{U}{Nh} = \frac{\lambda}{2\pi h}$  با افزایش میزان تغییرات شوری، طول موج تشکیل شده ناشی از حرکت جسم در محیط نیز کاهش خواهد یافت (رابطه خطی و معکوس با یکدیگر دارند). بنابراین با شناخت مناسب مشخصات امواج تشکیل شده و میزان تغییرات شوری محیط، می‌توان تخمینی از ابعاد و سرعت جسم متحرک به دست آورد.



شکل ۵. تغییرات طول موج افقی امواج با ضخامت جسم بی‌بعد شده، برحسب عدد فرود به همراه منحنی تئوری خطی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مقاله بیدختی [۵]

- M. The phase configuration of trapped internal waves from a body moving in a thermocline. *Applied scientific research*. 1986 Jun 1;43(2):91-105.
- [10] Swain SK, Trinath K. Non-Acoustic Detection of Moving Submerged Bodies in Ocean. *International Journal of Innovative Research and Development*. 2012 Dec 1;1(10):361-72.
- [11] Abdilghanie AM, Diamessis PJ. The internal gravity wave field emitted by a stably stratified turbulent wake. *Journal of Fluid Mechanics*. 2013 Apr;720:104-39.
- [12] Ohya Y, Uchida T, Nagai T. Near wake of a horizontal circular cylinder in stably stratified flows. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2013 Nov 1;3(4):311.
- [13] Wong AB, Griffiths RW, Hughes GO. Shear layers driven by turbulent plumes. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001 May;434:209-41.
- [14] Mitkin VV, Chashechkin YD. Experimental Investigation of the Velocity Field near a Cylinder in a Continuously Stratified Fluid. *Fluid Dynamics*. 2000 Sep 1;35(5):642-51.
- [15] Gill A. Atmospheric-ocean dynamics. *International Geophysics Series*. 1982;30:662.
- [16] Hopfinger EJ, Flor JB, Chomaz JM, Bonneton P. Internal waves generated by a moving sphere and its wake in a stratified fluid. *Experiments in Fluids*. 1991 Jul 1;11(4):255-61.

#### پی‌نوشت

1. wake
2. shadowgraphy
3. Ecmeter
4. DigitizeIt

که در حال درهم ریخته شدن است، امواج درونی دیگری نیز منتشر می‌شود. آزمایش نشان داد که این امواج می‌توانند ایجاد شوند، زمان طولانی در کانال باقی بمانند و با کمک این امواج می‌توان حضور یک جسم درون آب را شناسایی کرد.

بر اساس تجربه‌های حاضر که با آزمایش‌های محدود همراه بود، می‌توان پیشنهاد کرد که چنین سیستمی (تونل جریان با چینه‌بندی چگالی) با ابعاد بزرگ‌تر ساخته شود که از آن بتوان در آزمایش‌های با مقیاس بزرگ‌تر اجسام نیز استفاده کرد. همچنین برآورد می‌شود که حرکت اجسام در تونلی با این خاصیت کمترین اختلاط را ایجاد کرده و می‌توان نیم‌رخ چگالی آن را برای مدت زیاد و برای آزمایش‌های متعدد در نظر گرفت.

#### مراجع

- [1] Nansen F, editor. The Norwegian North polar expedition, 1893-1896: scientific results. Longmans, Green and Company; 1905.
- [2] Sutherland BR, Linden PF. Internal wave excitation by a vertically oscillating elliptical cylinder. *Physics of Fluids*. 2002 Feb;14(2):721-31.
- [3] Aguilar DA, Sutherland BR, Muraki DJ. Laboratory generation of internal waves from sinusoidal topography. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2006 Jan 1;53(1-2):96-115.
- [4] Glushko GS, Gumilevskii AG, Polezhaev VI. Evolution of the turbulent wakes of spherical bodies in stably stratified media. *Fluid dynamics*. 1994 Jan 1;29(1):10-6.
- [5] Bidokhti AA. Flow Visualization of Internal Waves and Wakes of a Streamlined Body in a Stratified Fluid. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016 Apr 1;9(2).
- [6] Thorpe SA. The turbulent ocean. Cambridge University Press; 2005 Oct 27.
- [7] Garrett C, Munk W. Internal waves in the ocean. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1979 Jan;11(1):339-69.
- [8] Dotsenko SF, Savoskin VM. Generation of internal waves by moving non-stationary disturbances in a real stratified ocean. *Physical Oceanography*. 1994 Sep 1;5(5):335-47.
- [9] Stevenson TN, Kanellopoulos D, Constantinides