

مطالعه تجربی طیف امواج درونی ناشی از حرکت یک مدل هیدروفویل شکل در یک شاره چینه‌بندی شده

محمد اکبر نژاد بایی^۱، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۲، محمد اکبری نسب^۳، مجتبی عظام^۴، سارا اله یاری بیک^۵

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

mohammad.akbarnejad@srbiau.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران

bidokhti@ut.ac.ir

^۳ استادیار، فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه مازندران، بابل

m.akbarinasab@umz.ac.ir

^۴ استادیار، فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

ezam@srbiau.ac.ir

^۵ استادیار، فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

s.allahyari@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

چکیده

حرکت اجسام زیرسطحی در لایه چینه‌بندی شده باعث شکل‌گیری امواج درونی می‌شود. در این مقاله، به مطالعه تجربی طیف امواج درونی ناشی از حرکت یک مدل هیدروفویل شکل در یک شاره چینه‌بندی شده پرداخته شده است. در محیط آزمایشگاهی در یک تانک شیشه‌ای به ابعاد $3 \times 1 \times 0.5$ متر، به کمک روش خطی با فرکانس شناوری معادل 0.44 بر ثانیه، چینه‌بندی صورت گرفت. در این محیط با استفاده از یک ارباب کششی، یک جسم هیدروفویل شکل با ضخامت 6 سانتی‌متر، طول 20 سانتی‌متر و پهنای 12 سانتی‌متر، برای بررسی تغییر در اعداد فرود و رینولدز محیط و تأثیر این تغییرات بر شکل‌گیری امواج درونی پشت جسم، در محدوده عدد فرود 0.19 تا 1.7 حرکت داده شد. با استفاده از تکنیک تصویربرداری از سایه و ثبت سیگنال‌های افت‌وخیز چگالی‌سنج، امواج درونی ناشی از حرکت جسم مورد شناسایی قرار گرفت، در این بررسی به خصوص طیف این افت‌وخیز در فاصله مشخصی از جسم مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه سیگنال‌های ثبت‌شده در حوزه فرکانس، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با ترسیم طیف فرکانس برای انواع سیگنال‌های ثبت‌شده به وسیله حس‌گر شوری‌سنج فوق‌سریع، فرکانس‌های غالب استخراج شد و نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود ترکیب فرکانس‌های بیشتری در محیط رخ می‌دهند. همچنین در تحلیل انرژی طیف امواج مشاهده شد که تا عدد فرود بحرانی یک، انرژی با افزایش عدد فرود، افزایش یافته و پس از آن به دلیل تلاطم، کاهش انرژی را مشاهده خواهیم کرد.

کلمات کلیدی: چینه‌بندی چگالی، امواج درونی، تصویربرداری از سایه، افت‌وخیزهای سیگنال شوری، عدد فرود، تحلیل

طیفی

۱. مقدمه

همان‌طور که امواج در سطح دریا وجود دارند، در داخل دریا و بین لایه‌هایی با چگالی متفاوت نیز ممکن است امواج تشکیل شوند که امواج درونی نامیده می‌شوند [۱]. از این امواج به‌عنوان عوامل ایجاد ساختار لایه‌ای در محیط‌های دریایی نام برده می‌شود. اسکولسر و همکاران، ضمن معرفی باد به‌عنوان یکی از عوامل تشکیل این امواج، به انتقال انرژی در راستای قائم به‌عنوان یکی از پیامدهای چنین امواجی اشاره کردند، به‌طوری‌که این امواج می‌توانند حداقل تا صدها کیلومتر از منبع خود منتشر شوند [۲]. یکی دیگر از عوامل ایجاد امواج درونی علاوه بر باد، عبور جریان‌های کشندی از روی ناهمواری‌های بستر دریا، پشته‌ها و شکستگی‌های فلات قاره است. انتشار این امواج که در مواردی ارتفاع آن‌ها به بیش از ۵۰ متر می‌رسد، باعث تغییر در الگوی انتشار امواج صوتی در دریا می‌شود [۳]، لازم به یادآوری است که استفاده از تغییرات پارامترهای هیدروفیزیکی در حین حرکت اجسام زیرسطحی می‌تواند در شناسایی و ردیابی این امواج بسیار مفید باشد و یکی از مهم‌ترین این پارامترها، امواج درونی و دنباله تلاطمی^۱ است.

در سال‌های گذشته تحقیقات گوناگونی روی امواج درونی و تلاطم در محیط‌های با چینه‌بندی چگالی انجام شده که در برخی از این تحقیقات امکان‌سنجی کانال‌های مخصوص برای مطالعه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت [۴-۶] و در برخی دیگر از این تحقیقات به مطالعه امواج درونی و دنباله تلاطمی اجسام در این‌گونه محیط‌ها پرداخته شد [۷-۹]. از طرفی امروزه با توجه به این مطلب که حرکت اجسام زیرسطحی در محیط چینه‌بندی شده، باعث ایجاد امواج درونی و تلاطم در ابعاد گسترده و دور از جسم در اقیانوس می‌شود، بررسی این امواج از طریق روش‌های غیر آکوستیکی، حتی با اندازه‌گیری‌های ساده مانند سنجش چگالی به طریق مستقیم یا نوری امکان‌پذیر است. به‌عنوان نمونه اسوین، با مروری بر روش‌های آشکارسازی اجسام زیرسطحی نشان داد که با روش‌های اپتوالکترونیکی می‌توان دنباله تلاطمی و امواج درونی ناشی از حرکت اجسام

زیرسطحی را بررسی کرد. البته نوع امواج درونی و تلاطم ایجادشده در این نوع محیط‌ها می‌تواند به جسمی وابسته باشد که در محیط حرکت می‌کند و با توجه به حساسیت موضوع اغلب نتیجه تحقیقات مربوط به آن‌ها در مجله‌های علمی کمتر منتشر می‌شود [۱۰]. مطالعه‌های متعدد آزمایشگاهی و عددی نیز درباره این مسئله توسط محققان مختلف در سال‌های گذشته صورت گرفته است.

ماوی و همکاران، ضمن شبیه‌سازی عددی حرکت یک زیردریایی سابوف در شارهای چینه‌بندی شده، دریافتند با افزایش عدد فرود و سرعت شناور، طول موج امواج درونی افزایش و زاویه درونی امواج کلون کاهش می‌یابد [۱۱]. وروپایوا و همکاران، دنباله یک جسم در حال حرکت در یک شار چینه‌بندی شده را با روش عددی بررسی کردند و دریافتند که این حرکت می‌تواند امواج درونی با دامنه بسیار بزرگ ایجاد کند [۱۲]. هاپفینگر و همکاران با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی دنباله حرکت جسمی کروی را در یک شار چینه‌بندی شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد جریان حاصل از این حرکت برای عدد فرود کمتر از ۴ توأم با امواج درونی است. درحالی‌که برای عدد فرود بزرگ‌تر از ۴ دنباله ناشی از حرکت جسم با ساختارهای همدوسی و تلاطم با امواج درونی نامنظم همراه است، همچنین انتقال انرژی در این حرکت اغلب با امواج درونی و اتلاف تلاطمی همراه است [۱۳]. متکین و چشکین در سال ۱۹۹۵ و چشکین و همکاران در سال ۲۰۰۰ جریان حول استوانه در حال حرکت درون یک شار چینه‌بندی چگالی پیوسته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات ایشان حاکی از آن بود که جریان یادشده در عدد فرود بسیار کوچک رخ می‌دهد، به‌طوری‌که جریان‌های ناشی از امواج درونی در اثر حرکت جسم در این حالت نیز مشهود است و اثرات گرانیوی زیاد و اغتشاش مربوط به جسم در جلو جسم نیز مشاهده می‌شود [۱۴-۱۵]. وانگ و گریفیت، نیز در بررسی‌های آزمایشگاهی شاهد حضور جریان‌های برشی همراه میدان جریان امواج درونی ناشی از حرکت یک پلوم بودند [۱۶]. گلویشکو و همکاران، دنباله تلاطمی جسمی در حال حرکت در یک شار چینه‌بندی شده را با استفاده از یک مدل ریاضی بررسی کردند. این محققان

که ω فرکانس زاویه‌ای موج، N فرکانس شناوری محیط میانگین ظاهر می‌شود [۱۷]. چشگین و میتکین نیز با استفاده از مشاهده جریان در پشت یک نوار در حال حرکت درون یک شاره چینه‌بندی شده، پی بردند که برای سرعت بیش از حد نوار یک ساختار گردابه‌ای پروانه مانند تشکیل می‌شود [۱۸].

دسنکرو و ساوسکین، به بررسی امواج ایجادشده به وسیله یک جسم خارجی در یک شاره چینه‌بندی شده به شکل دوبعدی پرداخته‌اند. نتایج تحقیقات این محققان حاکی از آن بود که تشدید و برهمکنش امواج می‌تواند امواج درونی با دامنه بسیار بزرگ در اقیانوس ایجاد کند [۱۹]. اوپیا و همکاران، دنباله حرکت یک جسم استوانه‌ای را در یک شاره چینه‌بندی شده به عمق محدود مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که فرکانس جدایش تاوها از جسم و حالت دوبعدی آن‌ها با افزایش چینه‌بندی چگالی تغییر می‌کند [۲۰]. روو و همکاران، نیز با استفاده از همانندسازی عددی اثرات امواج درونی که از دنباله‌های تلاطمی شکل می‌گیرند را مورد بررسی قرار دادند. از جمله نتایج به دست آمده توسط این محققان می‌توان به تاثیر مهم امواج درونی در انتقال انرژی در راستای قائم اشاره کرد [۲۱].

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^2 w + N^2 \nabla_h^2 w + f^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{N^2}{g} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial z \partial t^2} + f^2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\bar{\rho}} \left[f \left(\nabla \frac{\partial F}{\partial z} \right)_z + \nabla_h \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial t} - \nabla_h^2 \frac{\partial F z}{\partial t} \right] \quad (2)$$

که w سرعت قائم، t زمان، f فرکانس لختی، N فرکانس شناوری، g نیروی گرانش و F نیروهای خارجی هستند. اگر فرض شود که سرعت قائم نسبت به زمان متناوب ثابت باشد و $F \equiv 0$ ، معادله ۲ به صورت معادله زیر می‌شود:

$$\nabla_h^2 W_0 - \frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2} \left(\frac{\partial^2 W_0}{\partial z^2} - \frac{N^2}{g} \frac{\partial W_0}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

که ضریب $\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2}$ نوع معادله دیفرانسیل جزئی را تعیین می‌کند. اگر $\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2} < 0$ باشد، آن گاه معادله ۳ دیفرانسیل جزئی بیضوی نامیده می‌شود و بیان می‌کند در غیاب یک سطح آزاد یا سطح مشترک حرکت موجی امکان‌پذیر نیست، اگر $\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2} > 0$ باشد، معادله دیفرانسیل هذلولی نامیده می‌شود و بیانگر این موضوع است که حرکت موجی امکان‌پذیر است، اگر برای تمامی z ها، $f^2 > N^2(z)$ باشد، حرکت موجی وقتی امکان‌پذیر است

که:

$$f < \omega < N \quad (4)$$

دریافتند که افت و خیزها در دنباله جسم بزرگ‌تر از جریان میانگین ظاهر می‌شود [۱۷]. چشگین و میتکین نیز با استفاده از مشاهده جریان در پشت یک نوار در حال حرکت درون یک شاره چینه‌بندی شده، پی بردند که برای سرعت بیش از حد نوار یک ساختار گردابه‌ای پروانه مانند تشکیل می‌شود [۱۸]. دسنکرو و ساوسکین، به بررسی امواج ایجادشده به وسیله یک جسم خارجی در یک شاره چینه‌بندی شده به شکل دوبعدی پرداخته‌اند. نتایج تحقیقات این محققان حاکی از آن بود که تشدید و برهمکنش امواج می‌تواند امواج درونی با دامنه بسیار بزرگ در اقیانوس ایجاد کند [۱۹]. اوپیا و همکاران، دنباله حرکت یک جسم استوانه‌ای را در یک شاره چینه‌بندی شده به عمق محدود مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که فرکانس جدایش تاوها از جسم و حالت دوبعدی آن‌ها با افزایش چینه‌بندی چگالی تغییر می‌کند [۲۰]. روو و همکاران، نیز با استفاده از همانندسازی عددی اثرات امواج درونی که از دنباله‌های تلاطمی شکل می‌گیرند را مورد بررسی قرار دادند. از جمله نتایج به دست آمده توسط این محققان می‌توان به تاثیر مهم امواج درونی در انتقال انرژی در راستای قائم اشاره کرد [۲۱].

هدف اصلی این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی امواج درونی پشت جسم هیدروفویل شکل در اعداد فرود مختلف در یک محیط چینه‌بندی شده خطی با ثبت تصاویر به کمک روش تصویربرداری از سایه و تحلیل سیگنال‌های ثبت شده حس گر چگالی سنج پاسخ سریع در حوزه فرکانسی است، همچنین با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی جسم و جریان رژیم‌های مختلف جریان با توجه به امواج درونی ایجادشده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲. مبانی نظری

با استفاده از نظریه خطی گیل (۱۹۸۲)، می‌توان رابطه واپاشی حرکت امواج درونی را در یک شاره چینه‌بندی شده به صورت زیر نشان داد [۲۲-۲۳]:

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

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

$$\lambda = \frac{2^{1/2} H}{\left[\left(\frac{NH}{\pi U} \right)^2 - n^2 \right]^{1/2}} \quad (10)$$

که مشابه رابطه (۶) است، ولی ساختار موج در راستای قائم با H عمق شاره بی بعد شده است نه ضخامت جسم h ، برای مد $n = 0$

$$\lambda = 2^{1/2} H \pi Fr \quad (11)$$

که $Fr = (NH / U)^{-1}$ است؛ بنابراین می توان 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 روش کار

۳-۱. لایه بندی خطی محیط آزمایشگاهی

در این پژوهش همه آزمایش ها در یک تانک شیشه ای به ابعاد $3 \times 1 \times 0.5$ متر انجام شده است. این تانک شیشه ای با استفاده از دو تانکر 750 لیتری با هدایت های الکتریکی متفاوت شور (50 میلی زمینس) و شیرین لایه بندی می شود [۲۴]. سطح آب دو مخزن به یک میزان پر شده است. ابتدا در بچه مخزن آب شور را باز نموده و با استفاده از یک شیلنگ که بر سر خروجی آن به درون کانال، اسفنجی قرار داده شده، آب شور را وارد تانک آزمایش جاری می کنیم، سپس به آرامی در بچه بین دو مخزن را باز می کنیم. ورود و آب گیری کانال با آب شور باید بسیار آرام صورت گیرد، به طوری که موجب برهم خوردگی و درهم آمیختگی لایه ها نشود. زمانی حدود 4 ساعت صرف می شود که تانک آزمایش تا ارتفاع 80 سانتی متر آب گیری شود، دقت عمق سنج مورد استفاده در آزمایش ها به میزان یک میلی متر بوده است. همان طور که از شیوه آب گیری و ایجاد شاره چینه بندی 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 می کند؛ زیرا همان طور که در بالا گفته شد سطح

بنابراین در عمق Z حد بالای فرکانس امواج درونی با فرکانس شناوری N و حد پایین آن با فرکانس اینرسی مشخص می شود.

هنگامی که جسمی با سرعت متوسط U در یک شاره چینه بندی شده با فرکانس شناوری N حرکت می کند، طول موج امواج از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda = 2\pi \frac{U}{N} \quad (5)$$

عدد فرود جریان با h (ضخامت جسم در راستای قائم) عبارت است از:

$$Fr = \frac{U}{Nh} = \frac{\lambda}{2\pi h} \quad \text{or} \quad \lambda = 2\pi \cdot h \cdot Fr \quad (6)$$

جریان دنباله به عدد رینولدز وابسته است.

$$R = \frac{UD}{v} \quad (7)$$

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

این نشان می دهد، هنگامی که امواج درونی در جریان قابل ملاحظه است، طول موج امواج ایجاد شده (نرمال شده با h) به طور مستقیم با عدد فرود متناسب است.

برای امواج درونی ساکن نسبت به جسم در حال حرکت در یک شاره چینه بندی شده با ضخامت به نسبت کم H ، با توجه به شرایط مرزی کف و سطح (تقریب مرز سخت) می توان نشان داد که ساختار موج دارای ساختار مدی است (معروف به مدهای نرمال، گیل [۲۲]) و ساختار آن با رابطه زیر ارائه می شود (اوهیا و همکاران [۱۲]):

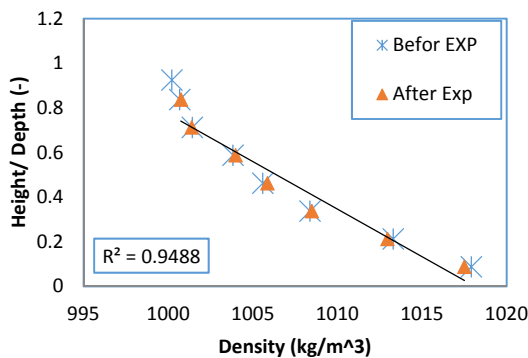
$$\frac{NH}{\pi U} = \left(n^2 - k_x^2 \frac{H^2}{\pi} \right)^{1/2} \quad (8)$$

که در آن H عمق شاره و $\frac{2H}{n}$ طول موج مد n حرکت است. آن ها همین طور نشان دادند که برای موج ایستا نسبت به جسمی با عدد موج افقی در راستای حرکت هنگامی که $k_x \rightarrow 0$ خواهیم داشت:

$$\frac{NH}{\pi U} = n \quad (9)$$

عبور می کند. این نور تصویری از سایه میدان جریان را که نشان دهنده امواج ناشی از حرکت مدل هیدروفویل است، روی کاغذ مات نازک چسبیده به بدنه شفاف کانال تشکیل می دهد. سایه میدان جریان با دوربین عکاسی و فیلم برداری، ثبت می شود.

پس از چینه بندی کانال، با اندازه گیری شوری و دما، فرکانس شناوری (N) محیط محاسبه شد. شکل ۲ روند تغییرات چگالی در راستای قائم (بی بعد شده با ارتفاع آب) را برای قبل و بعد از اندازه گیری ها نشان می دهد. در آزمایش های به عمل آمده، بسامد شناوری بر اساس گرادیان متوسط نیم رخ قائم چگالی معادل ۰/۴۴ بر ثانیه محاسبه شد. پس از انجام آزمایش ها این عدد برابر ۰/۴۳ اندازه گیری شده است. در نتیجه، تغییر نیم رخ قائم چگالی بسیار اندک است که نمایانگر اختلاط بسیار اندک ستون آب است.



شکل ۲. نیم رخ های قائم چگالی قبل و بعد از انجام آزمایش ها

جدول ۱ شرایط آزمایش ها را با طول و ارتفاع امواج ایجاد شده به وسیله جسم در سرعت های مختلف، پس از پردازش تصویر و تحلیل فریم به فریم عکس ها و با توجه به اعداد فرود مختلف با میزان خطای مثبت و منفی یک میلی متر نشان می دهد. در سرعت های ۴ و ۴/۵ سانتی متر بر ثانیه به دلیل وجود تلاطم زیاد در محیط، امواج درونی قابل مشاهده نیستند. در این تحقیق، دامنه تغییرات عدد رینولدز از ۱۰۰۰ تا ۹۰۰۰ و عدد فرود ۰/۱۹ تا ۱/۷ مورد بررسی قرار گرفت.

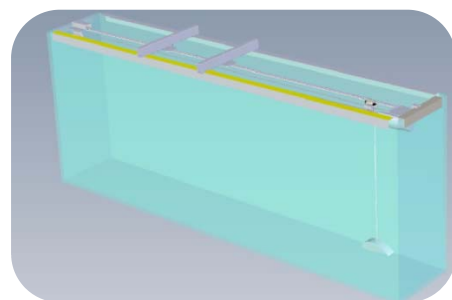
با استفاده از روش سایه نگاری و پردازش این تصاویر و اعمال مقیاس گذاری صورت گرفته روی کانال، به محاسبه طول و ارتفاع امواج درونی در پشت جسم پرداخته شد که با روابط

سیال در دو مخزن ۱ و ۲ هم سطح است. آب شیرین با وارد شدن به مخزن شماره ۲، غلظت شوری آن را رقیق نموده و در کانال شاره ای چینه بندی شده با چگالی پیوسته خطی خواهیم داشت. فرکانس شناوری (N) بر اساس گرادیان متوسط نیم رخ قائم چگالی در این آزمایش ها معادل ۰/۴۴ بر ثانیه است، نیم رخ قائم چگالی را با یک شوری سنج دقیق^۲ با دقت یک صدم میلی زمینس به دست می آوریم.

۲-۳. مشخصات جسم هیدروفویل شکل و سیستم کشتی

به منظور بررسی امواج درونی و ویک پشت جسم، از یک هیدروفویل به ضخامت ۶ سانتی متر و طول ۲۰ سانتی متر و پهنای ۱۲ سانتی متر استفاده شد. به وسیله یک ارباب متصل به برنامه رایانه ای این جسم در محدوده ۰/۵ میلی متر بر ثانیه تا ۴/۵ سانتی متر بر ثانیه حرکت داده می شود. دقت حرکت این ارباب به میزان یک دهم میلی متر بر ثانیه است. برای تصویر برداری از ویک های^۳ ایجاد شده و امواج درونی ناشی از حرکت جسم، از روش نوری معروف به سایه نگاری^۴ استفاده شد.

مدل در امتداد مرکز تونل به حرکت در آورده می شود، حرکت مدل در راستای افقی با یک سیستم ارباب، ریل و موتور الکتریکی کنترل شده با رایانه صورت می گیرد و سرعت جسم کنترل می شود. در آزمایش ها از نیم رخ قائم چگالی خطی استفاده شده است. شکل ۱ نمایی شماتیک از کانال آزمایشگاهی به همراه مدل مورد استفاده است.



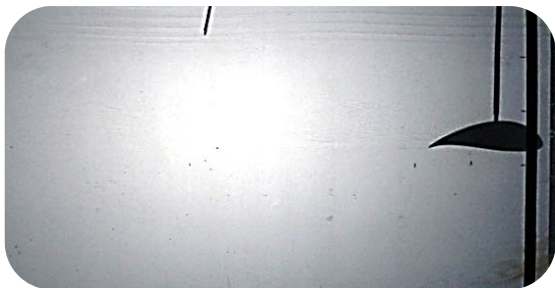
شکل ۱. نمای شماتیک کانال جریان با چینه بندی چگالی و جسم هیدروفویل شکل درون آن

چشمه نور از یک پروژکتور تشکیل شده که در فاصله زیاد از کانال، نوری تقریباً موازی را به کانال تابانده که از عرض آن

قلب این نرم افزار نوشته شده است، نویزهای آن حذف می شود. پس از حذف نویز، سیگنال های استخراج شده مورد تحلیل قرار می گیرد. با استفاده از سیگنال ها و نمودارها، میزان فعالیت امواج درونی و ارتفاع امواج تشکیل شده استخراج و ثبت می شود.

۴. نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج آزمایش های مدل در حال حرکت در شاره چینه بندی شده با چگالی پیوسته پرداخته می شود، فرکانس شناوری شاره معادل $0/44$ بر ثانیه است و در طول آزمایش ها تغییرات بسیار اندکی داشته که قابل چشم پوشی است. شکل ۳، میدان جریان اطراف جسم در حال حرکت را برای عدد فرود $1/14$ که با استفاده از روش سایه نگاری تصویربرداری شده است، نشان می دهد، با توجه به تحلیل تصاویر مشخص است که با افزایش عدد فرود میزان فعالیت امواج درونی افزایش یافته و طول امواج بلندتر می شود، البته از عدد فرود $1/33$ به بعد محیط تلاطمی شده و امواج درونی قابل مشاهده نیستند.



شکل ۳. میدان جریان پشت مدل هیدروفویل، برای عدد فرود $1/14$ وقتی جسم در حرکت است

امواج درونی ایجاد شده برای اعداد فرود $0/38$ به بعد کاملاً قابل ملاحظه اند و در نزدیک سطح، کف و پشت جسم دیده می شوند، طول این امواج با افزایش اعداد فرود افزایش می یابد، فعالیت امواج درونی برای عدد فرود نزدیک به یک مشخص است.

وقتی جسم با عدد فرود بحرانی حرکت می کند، دنباله جسم تلاطمی شده و فعالیت امواج اصلی ناشی از حرکت جسم کاهش می یابد. دنباله تلاطمی در دوردست جریان کاملاً مغشوش خواهد بود. این نتایج با نتایج آزمایشگاهی هافینگنر

۵ و ۶ 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 آزمایش ها در هر سرعت، میزان طول و ارتفاع امواج در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه ای از شرایط آزمایش ها به همراه طول و ارتفاع امواج درونی ایجاد شده (ابعاد بر حسب سانتی متر)

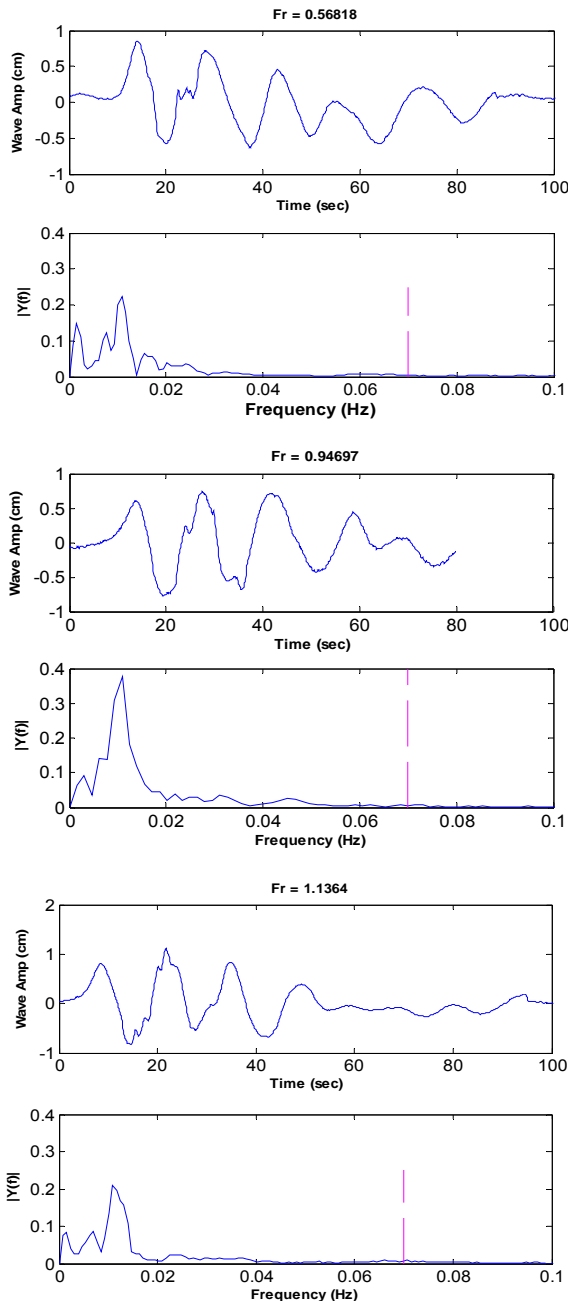
سرعت	عدد رینولدز	عدد فرود	طول موج (تئوری)	طول موج (آزمایش)	ارتفاع موج (آزمایش)
۰/۵	۱۰۰۰	۰/۱۹	۷/۱۴	-	-
۰/۷	۱۴۰۰	۰/۲۷	۹/۹۹	-	-
۱	۲۰۰۰	۰/۳۸	۱۴/۲۷	۱۳	۱/۱
۱/۵	۳۰۰۰	۰/۵۷	۲۱/۴۱	۱۹	۱/۴
۲	۴۰۰۰	۰/۷۶	۲۸/۵۵	۲۷/۵	۱/۷
۲/۵	۵۰۰۰	۰/۹۵	۳۵/۶۸	۳۶	۱/۹
۳	۶۰۰۰	۱/۱۴	۴۲/۸۲	۳۹	۲/۲
۳/۵	۷۰۰۰	۱/۳۳	۴۹/۹۵	۴۷/۵	۲/۴
۴	۸۰۰۰	۱/۵۲	۵۷/۰۹	trub	trub
۴/۵	۹۰۰۰	۱/۷۰	۶۴/۲۳	trub	trub

برای بررسی افت و خیزهای تغییرات شوری پشت جسم از حس گر چگالی سنج (شوری سنج) از پاسخ سریع که توسط بیدختی و بریتز (۲۰۰۲) ساخته شده است، استفاده شد [۶].

حس گر دستگاه شوری سنج با پاسخ بالا، یک لوله نازک عایق شده از بیرون است که آب از نوک آن، از یک سوراخ ریز بلوک کوچک پلاستیکی نصب شده در انتهای آن وارد شده و شوری آن سنجیده می شود، پاسخ این دستگاه در حد 500 هرتز است و قدرت تفکیک مکانی آن در حد یک میلی متر است. با توجه به اتصالات صورت گرفته، افت و خیزهای سیگنال های حاصل از دستگاه شوری سنج به صورت آنلاین روی صفحه نمایش دستگاه اسیلوسکوپ به نمایش درمی آید. فاصله حس گر و مدل برابر $5/2h$ (h قطر مدل) است، با توجه به اینکه سیگنال های دریافتی از دستگاه اسیلوسکوپ دارای نویز است، فایل خروجی از دستگاه به عنوان ورودی به نرم افزاری وارد شده و با برنامه ای که در

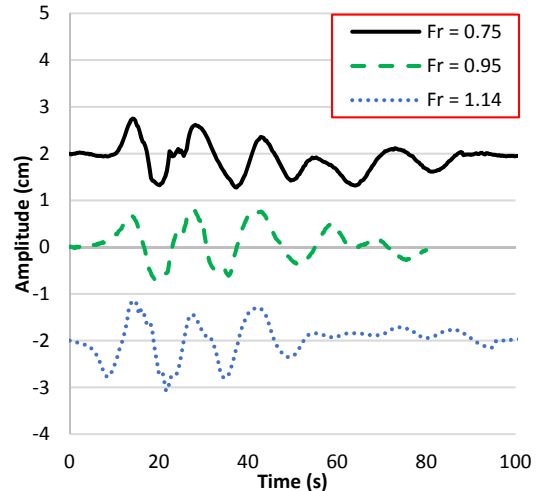
۴-۲. بررسی تحلیل فرکانسی سیگنال‌های ثبت شده

به طور معمول یکی از تحلیل‌هایی که روی هر دسته سیگنالی انجام می‌گیرد، تحلیل طیفی سیگنال است. با این تکنیک موج و فرکانس‌های غالب در سیگنال استخراج و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۶ چند نمونه از طیف‌های استخراج شده در اعداد فرود مختلف، نشان داده شده است.



شکل ۶. چگالی طیف فرکانسی برای سیگنال‌های ثبت شده شوری سنج با عدد فرود مختلف (خط چین قرمز محدوده فرکانس شناوری محیط را نشان می‌دهد).

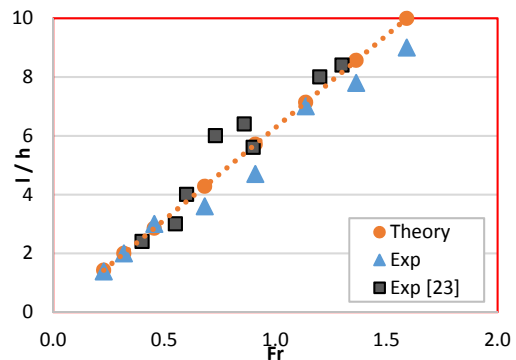
و همکاران که در محیط و شرایط مشابهی با پژوهش حاضر صورت گرفته است، مطابقت دارد [۱۳]. شکل ۴ نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی از دستگاه شوری سنج با پاسخ سریع را در اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد.



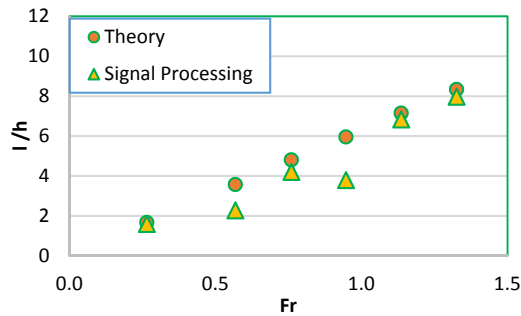
شکل ۴. سیگنال‌های دریافتی از دستگاه شوری سنج در اعداد فرود مختلف

۴-۱. صحت‌سنجی آزمایش‌ها

برای بررسی صحت نتایج آزمایش‌های انجام شده، نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی مقاله بیدختی در سال ۲۰۱۶ که دارای مشخصات بی‌بعد شده یکسانی با تحقیق حاضر است، مقایسه شد. این نتایج به همراه مقایسه آن با روابط تئوری خطی (رابطه ۶) در شکل ۵ آورده شده است. همان طور که در تصویر مشخص است، نتایج هم‌خوانی خوبی را با روابط تئوری و مطالعه انجام شده توسط بیدختی نشان می‌دهد [۲۳].



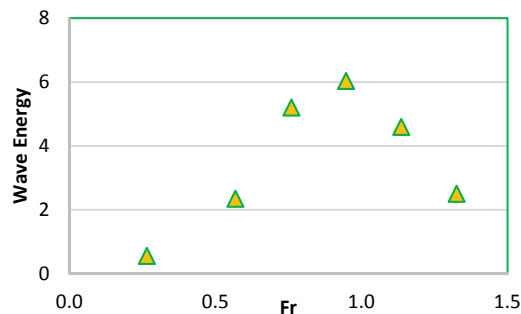
شکل ۵. تغییرات طول موج افقی امواج با ضخامت جسم بی‌بعد شده، برحسب عدد فرود به همراه منحنی تئوری خطی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مقاله [۲۳]



شکل ۷. مقایسه طول موج حاصل از روش تجربی با رابطه تئوری

شکل ۸ بررسی روند تغییرات انرژی موج در اعداد فرود مختلف را نشان می‌دهد، میزان انرژی موج با رابطه ۱۴ محاسبه شده است که a دامنه موج است. با بررسی مقادیر انرژی امواج درونی حاصل از تحلیل فرکانسی سیگنال‌های دریافتی، مشاهده می‌شود که انرژی امواج درونی با افزایش عدد فرود افزایش یافته و پس از عدد فرود بحرانی به دلیل پدیده تلاطم انرژی امواج مستهلک خواهد شد

$$E = \frac{a^2 \rho g}{2} \quad (14)$$



شکل ۸. انرژی امواج درونی در اعداد فرود مختلف

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه، حرکت یک جسم هیدروفویل شکل در یک کانال با شاره چینه‌بندی شده برای اعداد فرود مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در آزمایش‌های حرکت جسم در شاره با چینه‌بندی پیوسته نشان داده شد که با افزایش عدد فرود و رینولدز جریان، طول موج افقی امواج پشت جسم همان‌طور که تئوری پیش‌بینی می‌کند، افزایش می‌یابد. البته این حالت تا عدد فرود بحرانی مشاهده می‌شود و پس از آن، یعنی برای جریان فوق بحرانی، در پشت جسم یک دنباله تلاطمی ظاهر شده که بعد از مدتی به هم می‌ریزد.

شکل ۶ نمونه‌هایی از سیگنال‌ها و آنالیز طیفی برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که تمام نقاط قله فرکانسی در کمتر از فرکانس شناوری محیط اتفاق می‌افتد که این پدیده با رابطه (۴) $f < \omega < N$ تطابق دارد.

در ضمن با افزایش عدد فرود، تعداد ماکزیمم‌ها (قله‌ها) در یک طیف فرکانسی افزایش یافته و این به معنای حضور هارمونیک‌های جدید در موج تولید شده است. همچنین با افزایش عدد فرود، مشاهده می‌شود که طیف در حوزه فرکانس پهن‌تر خواهد شد. بعضی از فرکانس‌ها در چند عدد فرود مختلف حضور دارند و دارای مؤلفه‌های فرکانسی هستند که مقدار آن‌ها با یکدیگر متفاوت است و این نشان می‌دهد که یک فرکانس در چند عدد فرود مختلف همچنان حضور دارد. در حوزه فرکانس، در اعداد فرود مختلف، با نزدیک شدن به اعداد فرود بحرانی میزان قله‌ها افزایش یافته، که نشان از افزایش فعالیت امواج درونی دارد که بررسی مطالعات قبلی نیز این موضوع که با افزایش عدد فرود تا عدد فرود بحرانی افزایش فعالیت امواج درونی رخ می‌دهد را تأیید می‌کند [۶، ۱۷، ۱۳، ۲۳، ۲۱، ۲۵].

در ادامه با استفاده از فرکانس‌های غالب استخراج شده برای اعداد فرود مختلف، رابطه ۱، رابطه ۵ و جایگزینی $\omega = f_m/2\pi$ ، یک رابطه منطقی برای محاسبه طول موج که در مقاله قبلی محقق به صورت زیر محاسبه شده بود مورد بررسی قرار گرفت:

$$\lambda = \frac{U \cos(\theta)}{f_m} \quad (13)$$

که در رابطه بالا U سرعت جسم و f_m مقدار فرکانس بیشینه و θ زاویه انتشار موج است. در شکل ۷ مقایسه بین نتایج حاصل از تحلیل سیگنال در رابطه تجربی ۱۳ و رابطه تئوری ۶ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ نیز دیده می‌شود؛ رابطه ارائه شده برای اعداد فرود مختلف زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی مصداق داشته است.

- [5] Odell GM, Kovaszny LS. A new type of water channel with density stratification. *Journal of Fluid Mechanics*. 1971 Dec;50(3):535-43.
- [6] Bidokhti A, Britter R. A large stratified shear flow water channel facility. *Experiments in fluids*. 2002 Aug 1;33(2):281-7.
- [7] Dickey TD, Mellor GL. Decaying turbulence in neutral and stratified fluids. *Journal of Fluid Mechanics*. 1980 Jul;99(1):13-31.
- [8] Itsweire EC, Helland KN, Van Atta CW. The evolution of grid-generated turbulence in a stably stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986 Jan;162:299-338.
- [9] Webster CA. An experimental study of turbulence in a density-stratified shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1964 Jun;19(2):221-45.
- [10] Swain SK, Trinath K. Non-Acoustic Detection of Moving Submerged Bodies In Ocean. *International Journal of Innovative Research and Development (ISSN 2278-0211)*. 2012 Dec 1;1(10):361-72.
- [11] Ma W, Li Y, Ding Y, Duan F, Hu K. Numerical investigation of internal wave and free surface wave induced by the DARPA Suboff moving in a strongly stratified fluid. *Ships and Offshore Structures*. 2019 Sep 12:1-8.
- [12] Voropayeva OF, Moshkin NP, Chernykh GG. Internal waves generated by turbulent wakes in a stably stratified medium. *Computational technologies*. 2003 Sep 1; 48(9): 517-21.
- [13] 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.
- [14] Chashechkin YD, Gumennik EV, Sysoeva EY. Transformation of a density field by a threedimensional body moving in a continuously stratified fluid. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 1995 Jan 1;36(1):19-29.
- [15] 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.
- [16] Wong AB, Griffiths RW, Hughes GO. Shear layers driven by turbulent plumes. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001 May;434:209-41.
- [17] 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.

در ضمن برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های پشت جسم هیدروفویل شکل از یک حسگر شوری سنج با نمونه برداری سرعت بالا استفاده شد که با استفاده از این حسگر می‌توان با دقت زیادی میزان فعالیت امواج درونی، ارتفاع این امواج و تا حدودی طول موج را نیز استخراج نمود.

در این تحقیق با استفاده از استخراج فرکانس غالب برای اعداد فرود مختلف و اعمال آن در روابط مطالعات قبلی، رابطه‌ای منطقی بین سرعت جسم و طول موج ایجاد شده استخراج شد.

همچنین با استفاده از سیگنال‌های ثبت شده به وسیله حسگر شوری با پاسخ سریع و فرکانس شناوری محیط و با استفاده از رابطه $\frac{U}{Nh} = \frac{\lambda}{2\pi h}$ مشخصات جسم متحرک تا حدودی قابل تخمین است.

بر اساس تجربه‌های حاضر که با آزمایش‌های محدودی همراه بود، پیشنهاد می‌شود از چنین سیستمی (تونل جریان با چینه‌بندی چگالی) با ابعاد بزرگ‌تر برای انجام آزمایش‌هایی با مقیاس بزرگ‌تر یا تحلیل امواج در فواصل دوردست نیز استفاده شود. 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] Bonneton P, Chomaz JM, Hopfinger EJ. Internal waves produced by the turbulent wake of a sphere moving horizontally in a stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*. 1993 Sep;254:23-40.
- [2] Schlosser TL, Jones NL, Musgrave RC, Bluteau CE, Ivey GN, Lucas AJ. Observations of diurnal coastal-trapped waves with a thermocline-intensified velocity field. *Journal of Physical Oceanography*. 2019 Jul;49(7):1973-94.
- [3] Thorpe SA. *The turbulent ocean*. Cambridge University Press; 2005 Oct 27.
- [4] Stilling DC, Head MJ, Helland KN, Van Atta CW. A closed-loop gravity-driven water channel for density-stratified shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 1983 Jun;131:73-89.

- [18] Chashechkin YD, Mitkin VV. A visual study on flow pattern around the strip moving uniformly in a continuously stratified fluid. *Journal of Visualization*. 2004 Jun 1;7(2):127-34.
- [19] 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.
- [20] Ohya Y, Uchida T, Nagai T. Near wake of a horizontal circular cylinder in stably stratified flows. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2013 Nov 15;2013.
- [21] Rowe KL, Diamessis PJ, Zhou Q. Internal gravity wave radiation from a stratified turbulent wake. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020 Apr;888.
- [22] Gill AE. *Atmosphere-Ocean dynamics (International Geophysics Series)*. Academic press; 1982.
- [23] 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).
- [24] Martin AJ. Laboratory simulation and numerical modelling of the kinematics of oceanic internal waves [dissertation]. univ. Edinburgh; 1997.
- [25] Sutherland BR, Linden PF. Internal wave excitation by a vertically oscillating elliptical cylinder. *Physics of Fluids*. 2002 Feb;14(2):721-31.

پی نوشت

1. Turbulent wakes
2. Ecmeter
3. Wake
4. Shadowgraphy