

بررسی آزمایشگاهی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی بر خصوصیات هیدرولیکی امواج عرضی در آرایش زیگزاگ

کیمیا کمائی، مهدی قمشی*، مهدی دریائی، سید محمود کاشفی پور

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
* ghomeshi@scu.ac.ir

چکیده

امواج عرضی در اثر قرار گرفتن موانعی مانند پوشش گیاهی، پایه‌های پل و اسکله در مسیر جریان به وجود می‌آیند. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی بر خصوصیات امواج عرضی با چهار نوع موج در حالت تشدید پرداخته شد. کارگذاری موانع به صورت آرایش زیگزاگ، در دو فاصله عرضی ۱۲ و ۲۴ سانتیمتر و فاصله طولی ثابت ۱۲ سانتیمتر بود. کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۶ متر، عرض ۱٫۲۵ متر و ارتفاع ۰٫۶ متر انجام شد. دبی جریان در آزمایش‌ها بین ۳۰ تا ۳۸ لیتر بر ثانیه متغیر بود. نتایج نشان داد در حالت تشدید، با افزایش فاصله عرضی موانع (کاهش تراکم موانع)، دامنه نسبی موج افزایش یافت و بیشترین میزان دامنه نسبی موج تشکیل شده در آزمایش‌ها، برابر با ۳۳ درصد برای $T/D=9.6$ ، موج نوع چهار و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود. با افزایش دبی، دامنه نسبی موج در هر فاصله عرضی و هر چهار نوع موج، کاهش یافت. همچنین عدد استروهل با افزایش تراکم موانع کاهش یافت. با استفاده از تحلیل ابعادی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رابطه‌ای به منظور تعیین عدد استروهل در حالت تشدید با استفاده از نرم‌افزار آماری پیشرفته ارائه گردید و نتایج آنالیز حساسیت نشان داد تأثیر پارامتر عدد رینولدز مانع بر عدد استروهل از سایر پارامترها بیشتر است و با حذف این پارامتر از معادله ارائه شده برای عدد استروهل، R^2 ۴۶ درصد کم شد و خطای RMSE و MAE به طور متوسط دو برابر شد.

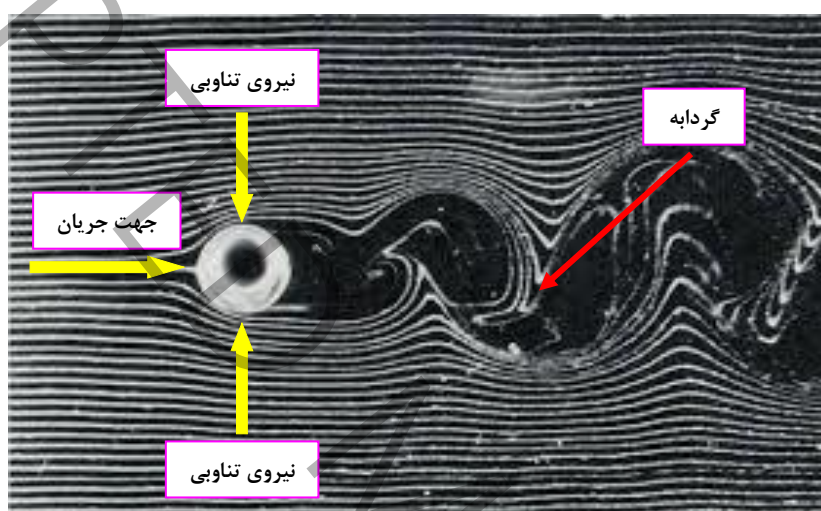
کلمات کلیدی

امواج عرضی، موانع مکعبی، فاصله عرضی، آرایش زیگزاگ، عدد استروهل

۱- مقدمه

وجود موانعی همچون پایه پل، پایه و شمع‌های اسکله‌های ساحلی، پوشش آبی و گیاهی در مسیر جریان و همچنین تغییر شکل ناگهانی دیواره‌های جانبی می‌تواند در جریان اغتشاش ایجاد کند و شکل و مسیر طبیعی آن را برهم زند. اضافه نمودن هرگونه مانع در مسیر جریان آب، سبب برهم زدن خطوط جریان و ایجاد جریان‌های چرخشی می‌شود که این پدیده منجر به وارد شدن نیروی نوسانی در جهت جریان و نیروی نوسانی دیگر، عمود بر جریان به مانع می‌شود. با عبور جریان از این موانع در پایین دست آنها اغتشاشی به نام

گردابه^۱ ایجاد می‌شود. در واقع با رسیدن ذره سیال به لبه بالادست مانع، سرعت صفر می‌شود و فشار ذره افزایش یافته و از فشار اولیه سیال به فشار دینامیک در نقطه سکون^۲ می‌رسد. فشار بالای سیال در نزدیکی مرز مانع سبب تشکیل لایه مرزی در طرفین مانع می‌شود. با رشد لایه مرزی و پس از طی مسافتی بر روی مرز مانع در اثر گرادیان فشار پدیده جداسازی^۳ خطوط جریان رخ می‌دهد. در پایین دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله^۴ و گردابه به وجود می‌آید. زمانی که گردابه‌ها به طور مرتب در دو سمت مانع ایجاد می‌شود، نیروهای تناوبی روی مانع ایجاد شده که این نیروها متقابلاً از مانع به سیال وارد می‌گردد (شکل ۱). با رفت و برگشت این نیروی تناوبی و برخورد آن با دیواره کانال سطح آب نیز متمایل به موج‌دار شدن می‌کند. در شرایط خاصی که فرکانس ناشی از گردابه موانع با فرکانس طبیعی نوسان سازه برابر گردد، حالت تشدید^۵ ایجاد شده و امواج عرضی^۶ با حداکثر دامنه در عرض کانال شکل می‌گیرد.

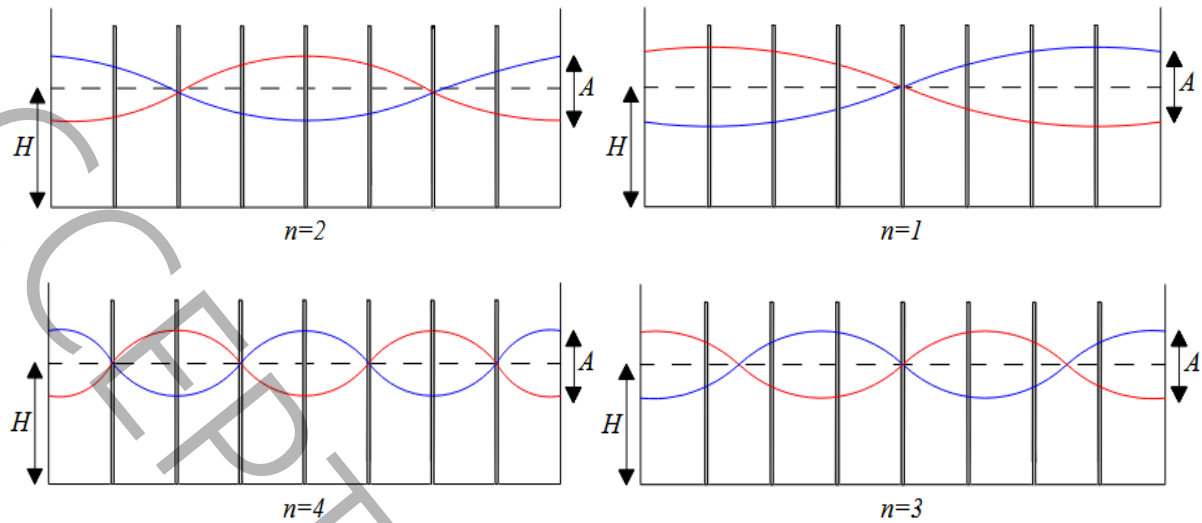


شکل ۱- نمای شماتیک تشکیل گردابه در پیرامون مانع

Fig. 1. Schematic view of the formation of vortex around the obstacle

در فلوم آزمایشگاهی که دیواره جریان بسته و ثابت است پدیده تشدید را می‌توان به شکل یک موج مکانیکی عرضی کامل و ایستا (بدین معنا که در نقاطی به نام گره ثابت‌اند) در حالت‌های مختلف مشاهده نمود. در شکل ۲ چهار حالت موج نیز نشان داده شده است که در آن A دامنه موج^۷ (حداکثر جابجایی سطح آب در دیواره کانال) و H عمق متوسط جریان است. در این شکل، موج نوع یک ($n=1$) دارای یک گره و موج نوع دو ($n=2$) دارای دو گره می‌باشد. همچنین موج نوع سه ($n=3$) و چهار ($n=4$) به ترتیب دارای سه و چهار گره می‌باشند. در تمامی موج‌ها، جریان به شکل یک موج سینوسی نوسان می‌کند.

-
- 1 Vortex
 - 2 Stagnation point
 - 3 Separation
 - 4 Wake
 - 5 Resonance
 - 6 Transverse waves
 - 7 Wave amplitude



شکل ۲- حالت‌های مختلف موج عرضی تشکیل شده در تحقیق حاضر
Fig. 2. Different modes of transverse wave formed in the present study

پدیده امواج عرضی می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به بار آورد. همچنین از جهت مسائلی مانند پایداری ساختمان‌های هیدرولیکی، فرسایش کناری و رسوب‌گذاری در بستر نیز بسیار حائز اهمیت است، بنابراین شناخت آن می‌تواند دلیل رویداد بعضی از پدیده‌ها باشد. هرچه دامنه موج بزرگتر و فرکانس انتشار آن کوچکتر باشد قدرت موج حاصل و تأثیرگذاری آن بر سازه‌های پیرامون خود بیشتر می‌گردد [۱]. اولین بار تأثیر متقابل جریان و سازه بر روی یکدیگر بر اثر پدیده خرابی پل تاکومانروز در سال ۱۹۴۰ مورد توجه قرار گرفت. این خرابی بسیار چشمگیر بود و دلیل آن عبور جریان هوا از بین پایه‌های پل و تولید گردابه بود [۲]. پس از آن تحقیقات فراوانی در رابطه با تشکیل گردابه و تشدید در برخورد سیالات (گازها و مایعات) با موانع مختلف صورت پذیرفت.

امواج عرضی دارای طول موج هستند که رابطه بین طول موج (λ)، عرض فلوم (b) و نوج موج (n) به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\lambda = \frac{2b}{n} \quad (1)$$

وایت^۱ [۳] با استفاده از فرکانس امواج، عدد بدون بعد استروهال^۲ را به صورت رابطه (۲) تعریف نمود:

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (2)$$

در این رابطه عدد استروهال با St ، فرکانس ناشی از گردابه موانع با f_s ، قطر موانع با D و سرعت متوسط جریان با U نشان داده شده است.

جعفری و همکاران^۳ [۴] در یک تحقیق آزمایشگاهی دامنه ده نوع موج عرضی را مورد بررسی قرار دادند و رابطه‌ای برای محاسبه حداکثر دامنه نسبی^۴ امواج عرضی (نسبت دامنه موج به عمق جریان) ناشی از گردابه در جریان آزاد آب بر روی موانع ارائه نمودند. پوستی‌زاده و قمشی [۵] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر امواج عرضی بر غلظت رسوبات معلق در پایین دست موانع با آرایش زیگزاگ در یک فلوم مستطیلی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که در حالت عدم وجود موج، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع برابر یا بیشتر از انتهای بازه بدون موانع است و امواج عرضی با کاهش انتقال رسوبات معلق در بازه موانع باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست موانع می‌گردند و موج نوع یک بیشترین تأثیر را داشته است. مصطفوی و همکاران [۶] امواج عرضی در

1 White
 2 Strouhal Number
 3 Jafari et al
 4 Relative amplitude

دو حالت آزاد و مستغرق را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از موانع استوانه‌ای و مثلثی در دو حالت برخورد جریان به رأس و برخورد جریان به ضلع استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد در حالت آزاد نسبت به حالت مستغرق امواج با دامنه بیشتری شکل می‌گیرد و بیشترین دامنه موج نوع یک، مربوط به موانع با مقطع مثلث در حالت برخورد جریان به ضلع بود و بیشترین دامنه موج نوع دو، مربوط به موانع استوانه‌ای بود. زیما و آکرمن^۱ [۲] در تحقیق خود با استفاده از موانع استوانه‌ای با قطرهای ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلیمتر، به بررسی امواج عرضی پرداختند و در آزمایش‌های خود موج نوع یک و در بعضی از آزمایش‌ها موج نوع دو را مشاهده کردند. میزان حداکثر دامنه نسبی مشاهده شده در آزمایش‌های آنها برابر ۳۵ درصد بود که در موج نوع یک، $T/D=4$ (فاصله موانع در یک ردیف و D قطر موانع)، آرایش زیگزاگ و عرض ۱۵ سانتیمتر تشکیل شد. پورمحمدی و همکاران [۷] به بررسی تأثیر شکل موانع بر خصوصیات امواج عرضی پرداختند و برای این منظور از موانع استوانه‌ای و مکعبی در دو حالت برخورد جریان به رأس و برخورد جریان به ضلع در آرایش موازی و فواصل طولی و عرضی متفاوت استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد بیشترین میزان دامنه نسبی موج عرضی برابر ۶۱ درصد برای موانع استوانه‌ای در فاصله طولی ۱۲۰ و عرضی ۶۰ میلیمتر بود. همچنین روابطی را برای تعیین عدد استروهمال ارائه نمودند و مشخص گردید عدد استروهمال با پارامتر P/D (فاصله بین ردیف‌های موانع و D قطر موانع) در موانع استوانه‌ای رابطه مستقیم و در موانع مکعبی رابطه عکس دارد. شاه‌کرمی و مقدسی [۱] به بررسی خصوصیات نوسانات سطحی و عرضی جریان ناشی از موانع استوانه‌ای در حالت‌های مختلفی که موانع درصدهای متفاوتی از عرض کانال را پوشانند، پرداختند. نتایج آنها نشان داد با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، نوسانات عرضی در عمق‌های بالاتر تشکیل می‌شود و دارای دامنه نوسان بزرگتری هستند. همچنین در یک عمق جریان ثابت با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، دامنه موج نیز افزایش پیدا می‌کند.

ژائو و همکاران^۲ [۸] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی نوسانات سطح آزاد در جریان کانال‌های روباز پرداختند. آنها آزمایش‌های خود را با استفاده از موانع استوانه‌ای در سه فاصله عرضی مختلف انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند حداکثر نوسانات در محدوده عدد رینولدز مانع بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ و عدد فرود در محدوده ۰/۲۴ الی ۰/۳۲ رخ می‌دهد. ویرو و همکاران^۳ [۹] تحقیقاتی تجربی روی امواج عرضی اطراف مجموعه‌ای از موانع استوانه‌ای انجام دادند. آنها بیان کردند عدد استروهمال در حالت تشدید، به آرایش و تراکم موانع بستگی دارد و عدد استروهمال در آرایش زیگزاگ بزرگتر از آرایش موازی است و با افزایش تراکم موانع نیز کاهش می‌یابد. راهمیر و همکاران^۴ [۱۰] در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه ایالتی یوتا پدیده امواج نوسانی را که در سال ۲۰۰۹ در محدوده پل I-84 در کانال نیویوک اتفاق افتاده بود، مدل‌سازی کردند و سعی در یافتن راه حلی جهت حذف این امواج نمودند. همچنین مطالعه آنها روی مدل آزمایشگاهی نشان داد که انتشار ورتکس از پایه‌ها سبب ایجاد نوسانات امواج می‌شود و شکل‌گیری گردابه در طول هر ردیف از پایه‌ها سبب می‌شود سرعت جریان در مرکز آبراهه کاهش یابد، درحالی‌که عمق جریان در آن افزایش می‌یابد. سلطانی و همکاران^۵ [۱۱] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های مکعبی در حالت برخورد جریان به رأس، هم در حضور و هم در عدم حضور امواج عرضی پرداختند. آنها در آزمایش‌های خود از گروه پایه‌هایی با سه فاصله عرضی مختلف استفاده کردند و فقط موج نوع یک را مشاهده نمودند. نتایج آنها نشان داد حداکثر عمق آبشستگی و همچنین حجم آبشستگی در حضور موج بیشتر از عدم حضور موج است و در هر گروه پایه، افزایش دامنه امواج عرضی منجر به افزایش عمق آبشستگی می‌شود.

عدد استروهمال، در تحلیل پدیده‌های تحت تأثیر گردابه و وابسته به زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع عدد استروهمال به عنوان اندازه فرکانس بدون بعد نوسان‌های این پدیده در نظر گرفته می‌شود. هدف از تحقیق حاضر بررسی مشخصات امواج عرضی در آرایش زیگزاگ با تغییر در فاصله عرضی موانع و دبی جریان با استفاده از مدل فیزیکی و ارائه روابطی به منظور تعیین فرکانس امواج حاصل از پدیده ارتعاش ناشی از گردابه است. همچنین با توجه به اینکه اکثر مطالعات صورت گرفته در خصوص امواج عرضی در فلوم با

1 Zima and Ackerman
2 Zhao et al
3 Viero et al
4 Rahmeyer et al
5 Soltani et al

عرض محدود و تعداد موج‌های کمتر صورت گرفته است، در این تحقیق سعی بر این بوده که با انجام آزمایش‌ها در یک فلوم عریض و ایجاد تعداد موج‌های بیشتر، به بررسی و شناخت رفتار موج در حالت‌های مختلف پرداخت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سیستم آزمایشگاهی

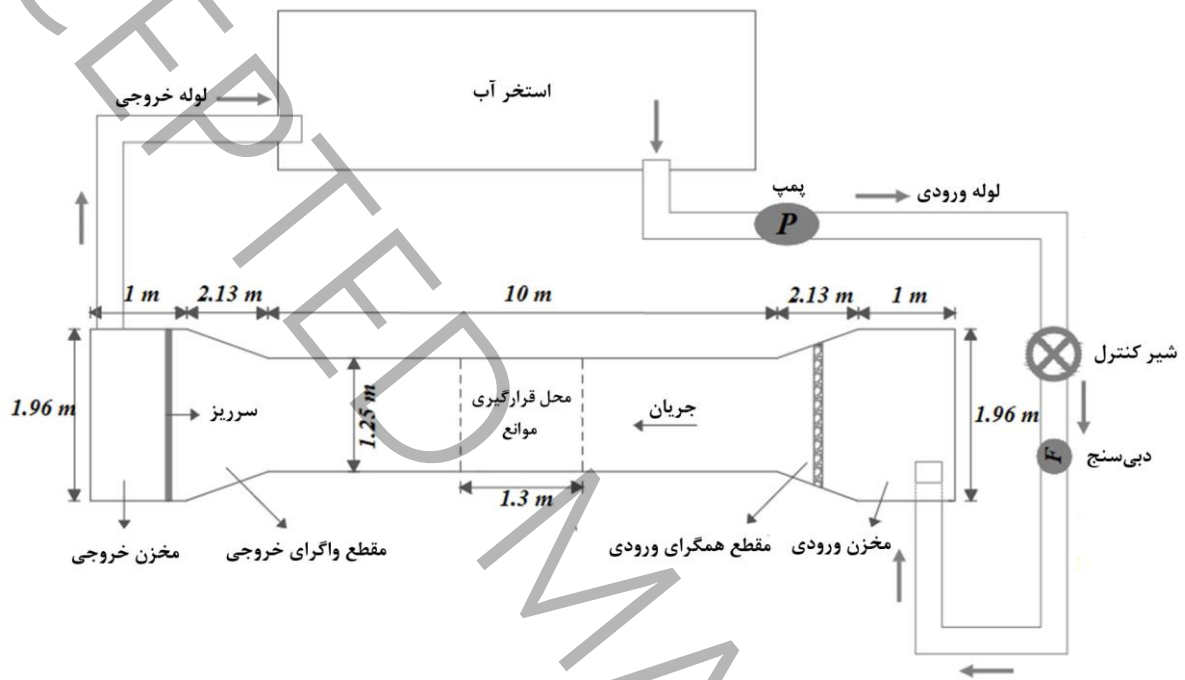
آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. بدین منظور از یک فلوم مستطیلی به طول ۱۶ متر، عرض ۱٫۲۵ متر، ارتفاع ۰٫۶ متر و شیب صفر استفاده شد. فلوم دارای یک مخزن آرام‌کننده در ابتدا قبل از مقطع همگرای ورودی و یک مخزن آرام‌کننده در انتها بعد از مقطع واگرای خروجی به طول ۱٫۹۶ متر و عرض ۱ متر بود. همچنین فلوم در پایین دست تبدیل واگرا مجهز به یک سرریز بود که جهت تنظیم سرعت و عمق جریان آب برای تشکیل امواج عرضی در حالت‌های مختلف از آن استفاده شد. آب مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها، از یک استخر به‌وسیله پمپ تأمین شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی از یک دبی‌سنج الکترومغناطیس دیجیتالی (مدل RPOMAG 53 با دقت $\pm 0.001 \text{ lit/s}$) در ورودی فلوم استفاده شد. دبی جریان مورد نظر با کنترل شیر کشویی در ورودی فلوم تنظیم شد. آزمایش‌ها در سه دبی ۳۰، ۳۴ و ۳۸ لیتر بر ثانیه انجام شدند. به‌منظور ورود جریان آرام و یکنواخت به فلوم، یک صفحه مشبک توری در قسمت میانی مقطع همگرای ورودی نصب شد (شکل ۳).

موانع مورد استفاده در این تحقیق، چوبی و به شکل مکعبی در حالت برخورد جریان به رأس بود. این موانع به‌صورت عمود بر جهت جریان نصب شدند. موانع با سطح مقطع مربع به ارتفاع ۴۰ سانتیمتر و ضلع ۲٫۵ سانتیمتر مورد استفاده قرار گرفتند. موج‌های تشکیل شده در تحقیق حاضر در حالت غیر مستغرق بودند، بنابراین ارتفاع موانع طوری انتخاب شد که با توجه به محدوده دبی مورد نظر، هر چهار نوع موج در حالت غیر مستغرق تشکیل شوند. همچنین در یک ردیف عرضی نباید فاصله موانع خیلی به هم نزدیک باشند زیرا در فواصل کم عرضی به دلیل افت انرژی زیاد موجی تشکیل نمی‌شود، بنابراین انتخاب قطر ۲٫۵ سانتیمتر برای موانع با توجه به شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر معیار مناسبی بود. برای تثبیت موانع در مسیر جریان، از یک صفحه پلکسی‌گلاس به طول ۱٫۳ متر و عرض ۱٫۲۴ متر که در قسمت میانی فلوم نصب شده بود، استفاده شد. به این صورت که تمام سطح صفحه پلکسی‌گلاس با فواصل طولی و عرضی ۶ سانتیمتر شبکه‌بندی و سپس رزوه شد تا بتوان موانع را روی آن پیچ نمود. موانع به‌صورت آرایش زیگزاگ، در فاصله طولی ثابت ۱۲ سانتیمتر و دو فاصله عرضی ۱۲ و ۲۴ سانتیمتر مورد آزمایش قرار گرفتند. فاصله‌های طولی و عرضی در این تحقیق به‌صورت فاصله مرکز به مرکز موانع است (شکل ۴). در مجموع ۲۴ آزمایش انجام شد.

۲-۲- مشاهدات

در شروع هر آزمایش با روشن کردن پمپ و باز کردن شیر کشویی روی خط لوله نصب شده به ورودی فلوم و تنظیم دبی، جریان به درون فلوم وارد می‌شد. سرریز تا اندازه‌ای بالا آورده می‌شد که ارتفاع آب تا لبه بالایی موانع قرار گیرد. در این حالت هیچ موجی ایجاد نمی‌شد، سپس به تدریج سرریز پایین آورده می‌شد تا موج نوع یک با دامنه کم شروع به نوسان کند، در این حالت سرریز به آهستگی پایین آورده شد. با پایین آوردن تدریجی سرریز، سرعت افزایش یافته و موج تشکیل شده شکل واضح‌تری به خود گرفته و دامنه آن به تدریج افزایش می‌یافت تا دامنه نوسان موج نوع یک حداکثر شود. بنابراین اندازه‌گیری‌ها با شروع نوسانات موج نوع یک شروع می‌شد. در آزمایش‌ها، به ازای هر ارتفاع سرریز در طول ناحیه مانع‌گذاری، بالاترین و پایین‌ترین سطح آب در طول یک نوسان روی دیواره فلوم خوانده شد تا دامنه موج و میانگین عمق جریان تعیین شود. برای اندازه‌گیری این دو پارامتر از خط‌کش‌های مدرج میلیمتری روی دیواره فلوم که در سه مقطع ابتدایی، میانی و انتهایی بازه نصب موانع قرار داده شده بودند، استفاده شد. در ادامه علیرغم پایین آوردن بیشتر ارتفاع سرریز و افزایش سرعت جریان، دامنه موج نوع یک رو به کاهش می‌گذارد. به عبارتی دامنه موج، با پایین آوردن بیشتر ارتفاع سرریز در جهت عکس حالت اولیه شروع به کاهش می‌کند و در نهایت موج نوع یک کاملاً حذف می‌شد. با ادامه این وضعیت (پایین آوردن بیشتر ارتفاع سرریز)، موج نوع دو با دامنه کم شروع به نوسان می‌کرد. سپس سرریز انتهایی به آهستگی در هر مرحله

پایین آورده شد تا موج نوع دو با حداکثر دامنه شکل گیرد و عمق جریان و دامنه موج برداشت می‌شد. پس از این مرحله با کاهش ارتفاع سرریز روند اندازه دامنه برعکس شده و کاهش می‌یافت تا اینکه موج نوع دو هم ضعیف یا حذف می‌شد. تمامی مراحل ذکر شده برای تشکیل موج نوع سه و چهار تکرار شد. با استفاده از یک کرنومتر، زمان ۱۵ نوسان موج جهت محاسبه فرکانس ناشی از گردابه موانع ثبت گردید $f_s = N/T$ که f_s فرکانس ناشی از گردابه موانع بر حسب هرتز، N تعداد نوسانات موج و T زمان نوسانات موج بر حسب ثانیه می‌باشد. به عبارتی از تطابق موج‌های عرضی در حالت تشدید با فرکانس گردابه‌های پشت موانع استفاده شد و فرکانس موج‌های عرضی که همان فرکانس پشت موانع است استخراج گردید.



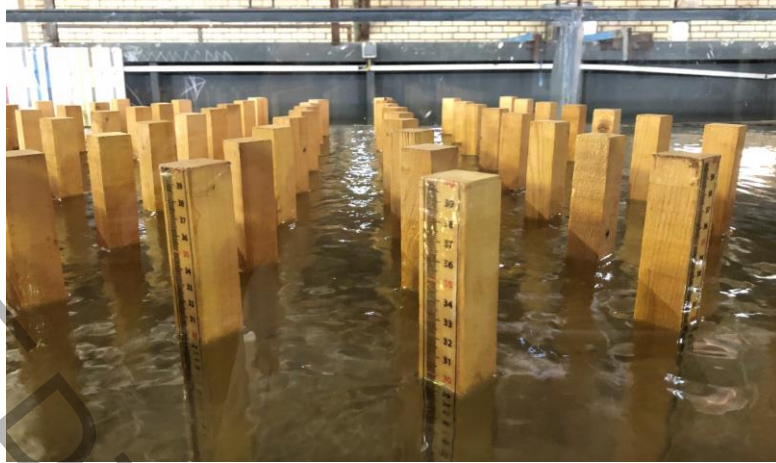
شکل ۳- نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مرتبط با آن (دید از بالا)

Fig. 3. A schematic view of the laboratory flume and related equipment (plan view)



شکل ۴- آرایش زیگزاگ موانع مکعبی در فاصله عرضی ۱۲ و ۲۴ سانتیمتر

Fig. 4. Staggered arrangement of cubic obstacles in transversal distance of 12 and 24 cm



شکل ۵- عبور جریان آب از میان موانع مکعبی و تشکیل گردابه در سطح آب

Fig. 5. Passage of flow through cubic obstacles and formation of vortex on the water surface

۳-۲- تحلیل ابعادی

برای نشان دادن فرکانس موانع می‌توان از عدد بدون بعد استروهال استفاده کرد. برای تعیین روابطی جهت محاسبه عدد استروهال، تابعی بین عدد استروهال و مشخصات جریان تعریف می‌شود:

$$\phi(\rho, \mu, g, Q, H, U, f_s, f_n, \lambda, n, A, D, T, P, N, b) = 0 \quad (3)$$

در رابطه بالا، ρ جرم واحد حجم مایع، μ لزوجت دینامیکی سیال، g شتاب گرانش، Q دبی جریان ورودی، H عمق متوسط جریان، U سرعت متوسط جریان، f_s فرکانس گردابه ناشی از موانع، f_n فرکانس طبیعی در کانال، λ طول موج، n نوع موج، A دامنه موج، D اندازه مانع، T فاصله بین موانع در یک ردیف، P فاصله بین ردیف‌های موانع، N تعداد موانع در یک ردیف و b عرض کانال است. با استفاده از تحلیل ابعادی و تئوری π -باکینگهام، رابطه (۳) را می‌توان برای به دست آوردن عدد استروهال به صورت رابطه (۴) نوشت. این رابطه، ارتباط بین عدد استروهال را با پارامترهای بدون بعد مؤثر بر آن نشان می‌دهد.

$$St = \phi_1 \left(\frac{A}{H}, \frac{f_s}{f_n}, \frac{\lambda}{b}, \frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N, n, \frac{\rho U D}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gH}} \right) \quad (4)$$

پارامتر دبی اثر خود را در پارامترهای عمق جریان، سرعت جریان و عرض کانال نشان می‌دهد، بنابراین از پارامتر دبی در رابطه (۴) صرف نظر شد. در رابطه (۴) اعداد بدون بعد رینولدز مانع^۱ و فرود^۲ وجود دارد. در حالت تشدید f_s با f_n برابر است، بنابراین در این حالت $\frac{f_s}{f_n}$ برابر یک بوده و از رابطه (۴) حذف شد. تأثیر پارامتر $\frac{\lambda}{b}$ در پارامتر نوع موج وجود داشته، در نتیجه این پارامتر هم از رابطه (۴) حذف شد. همچنین فاصله طولی موانع هم ثابت بود و پارامتر $\frac{P}{D}$ هم از رابطه (۴) حذف شد. با توجه به مطالب گفته شده رابطه (۴) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$St = \phi_2 \left(\frac{A}{H}, \frac{T}{D}, N, n, Re, Fr \right) \quad (5)$$

1 Obstacle Reynolds Number

2 Froude Number

۳- نتایج و بحث

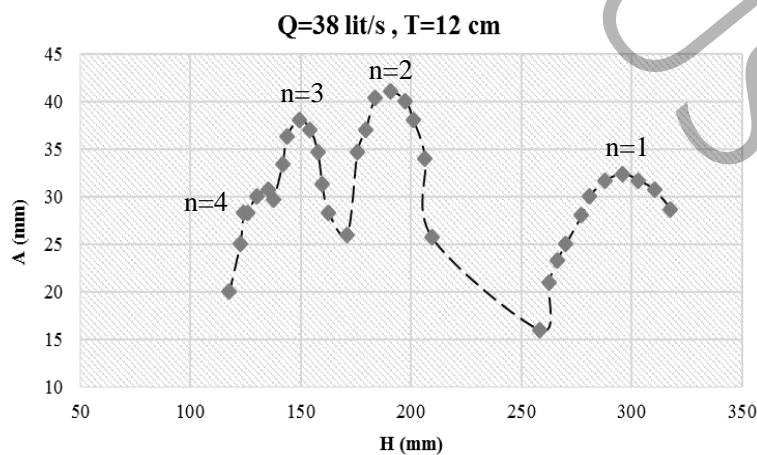
از دید فیزیکی در جریان آب و عبور از موانع، هنگامی که فرکانس ناشی از گردابه موانع با فرکانس طبیعی سازه برابر گردد حالت تشدید پدید می‌آید و سبب ایجاد نوسان سطح آب با حداکثر دامنه می‌شود [۱۲]. در این حالت تعداد صحیحی از گره‌ها در عرض کانال جای می‌گیرند که تعداد آنها همان نوع موج است. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر دبی و فاصله عرضی موانع مکعبی بر خصوصیات هیدرولیکی امواج عرضی در یک فلوم عریض با چهار نوع موج پرداخته شد. رژیم جریان در آزمایش‌ها، آشسته و زیر بحرانی بود. محدوده عدد رینولدز مانع و عدد فرود در حالت تشدید برای موج‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. هیدرودینامیک امواج عرضی به‌گونه‌ای است که در شرایط زیر بحرانی تشکیل می‌شود و امواج عرضی را فقط می‌توان در شرایط زیر بحرانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. ضمن اینکه تشکیل شدن امواج عرضی در شرایط زیر بحرانی در تحقیقات گذشته نیز ذکر شده است. از طرفی در شرایط فوق بحرانی اگر موجی تشکیل شود، به دلیل عمق کم جریان آب، اثر اصطکاک در کف افزایش می‌یابد بنابراین موج عرضی در این حالت پایدار نمی‌باشد و سریع از بین می‌رود. همچنین مسیرهای نوسانی وون کارمن^۱ زمانی اتفاق می‌افتد که عدد رینولدز مانع در دو بازه $40 < Re < 3 \times 10^5$ یا $Re > 3.5 \times 10^6$ قرار گیرد [۱۳]. در تحقیق حاضر عدد رینولدز مانع در حالت تشدید در محدوده $2319 < Re < 5627$ بود که نشان‌دهنده وجود گردابه‌های قوی پشت هر مانع می‌باشد.

جدول ۱- محدوده عدد رینولدز مانع و عدد فرود در حالت تشدید

Table 1. Range of Obstacle Reynolds Number and Froude Number in resonance

Froude Number	Reynolds Number	n
۰٫۰۵۵ - ۰٫۰۶۲	۲۳۱۹ - ۲۵۶۶	۱
۰٫۱۱۰ - ۰٫۱۲۳	۳۶۸۸ - ۳۹۸۹	۲
۰٫۱۵۶ - ۰٫۱۹۲	۴۶۰۹ - ۵۱۴۲	۳
۰٫۱۸۶ - ۰٫۲۱۰	۵۴۲۱ - ۵۶۲۷	۴

برای نشان دادن شرایط هیدرولیکی جریان در حداکثر دامنه در هر یک از انواع موج، تغییرات دامنه موج در مقابل عمق جریان برای موانع مکعبی در آرایش زیگزاگ، فاصله عرضی ۱۲ سانتیمتر و دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. روند تغییرات دامنه موج با عمق جریان مشابه است، بدین صورت که با کاهش عمق جریان برای هر نوع موج، دامنه موج افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک مقدار بیشینه، دوباره کاهش می‌یابد تا اینکه موج به‌طور کامل محو شود و موج بعدی تشکیل شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا موج نوع یک تشکیل می‌شود و به ترتیب موج‌های نوع دو، سه و چهار پدید می‌آیند.

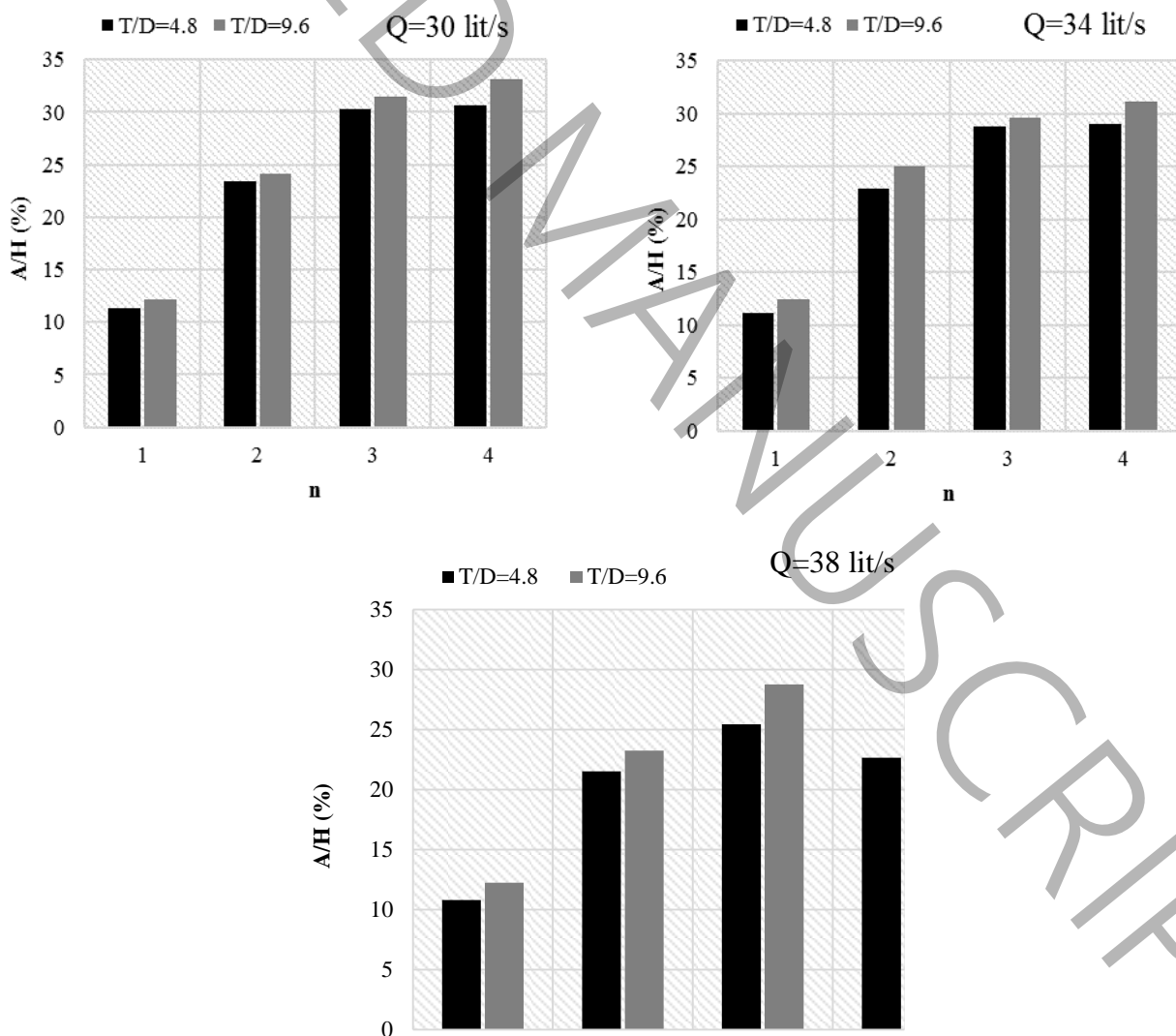


1 Von Karman Vortex Trail

شکل ۶- تغییرات دامنه موج (A) در مقابل عمق جریان (H)

Fig. 6. Variations of wave amplitude (A) versus flow depth (H)

به منظور بررسی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی روی دامنه نسبی موج در حالت تشدید، نمودار تغییرات دامنه نسبی موج (A/H) با تغییر فاصله عرضی بدون بعد (T/D) برای هر نوع موج در دبی‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله عرضی موانع، برای تمامی امواج میزان دامنه نسبی موج افزایش یافته، به طوری که برای هر نوع موج دامنه نسبی در $T/D=9.6$ بیشتر از $T/D=4.8$ است. بنابراین نتایج تحقیق حاضر نشان داد دامنه نسبی امواج عرضی با تعداد موانع در هر ردیف رابطه عکس و فاصله آنها در هر ردیف رابطه مستقیم دارد. بیشترین میزان دامنه نسبی موج در آزمایش‌ها، برابر ۳۳ درصد برای $T/D=9.6$ ، موج نوع چهار و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود و کمترین آن برابر ۱۰/۸ درصد برای $T/D=4.8$ ، موج نوع یک و دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه بود. قمشی و همکاران [۱۴] که مطالعه خود را با موانع استوانه‌ای با سه عرض ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتیمتر مورد بررسی قرار دادند، میزان حداکثر دامنه نسبی را برابر ۴۰ درصد در موج نوع سه برای $T/D=4.8$ ، آرایش موازی و در عرض ۸۰ سانتیمتر گزارش دادند. همچنین در مطالعه پورمحمدی و همکاران [۷] میزان حداکثر دامنه نسبی برابر ۶۱ درصد برای موانع استوانه‌ای بود که در $T/D=2.4$ ، آرایش موازی و در عرض ۷۴ سانتیمتر تشکیل شد. با افزایش T/D از ۴/۸ به ۹/۶، بیشترین میزان درصد افزایش دامنه نسبی موج، معادل ۳۰ درصد بود که مربوط به دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع چهار می‌باشد و کمترین آن معادل ۲/۷ درصد بود که مربوط به دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه و موج نوع سه می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات دامنه نسبی موج (A/H) با تغییر فاصله عرضی بدون بعد (T/D) در دبی‌های مختلف

Fig. 7. Variations of relative amplitude of the wave (A/H) by changing the dimensionless transversal distance (T/D) in different discharges

با توجه به نتایج به دست آمده از شکل ۷، مشاهده شد که با افزایش دبی از ۳۰ به ۳۸ لیتر بر ثانیه میزان دامنه نسبی موج در هر دو فاصله عرضی و هر چهار نوع موج، کاهش یافت که این نتیجه با یافته‌های پورمحمدی و همکاران [۱۵] همخوانی دارد. برای $T/D=4.8$ بیشترین میزان کاهش دامنه نسبی موج، معادل ۲۶ درصد در افزایش دبی از ۳۰ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع چهارم بود و کمترین آن معادل ۳ درصد در افزایش دبی از ۳۴ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع یک بود. همچنین برای $T/D=9.6$ بیشترین میزان کاهش دامنه نسبی موج، معادل ۱۱ درصد در افزایش دبی از ۳۰ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع چهارم بود و کمترین آن معادل ۱/۶ درصد در افزایش دبی از ۳۴ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع یک بود.

جدول ۲- خلاصه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی برای موانع مکعبی در حالت تشدید

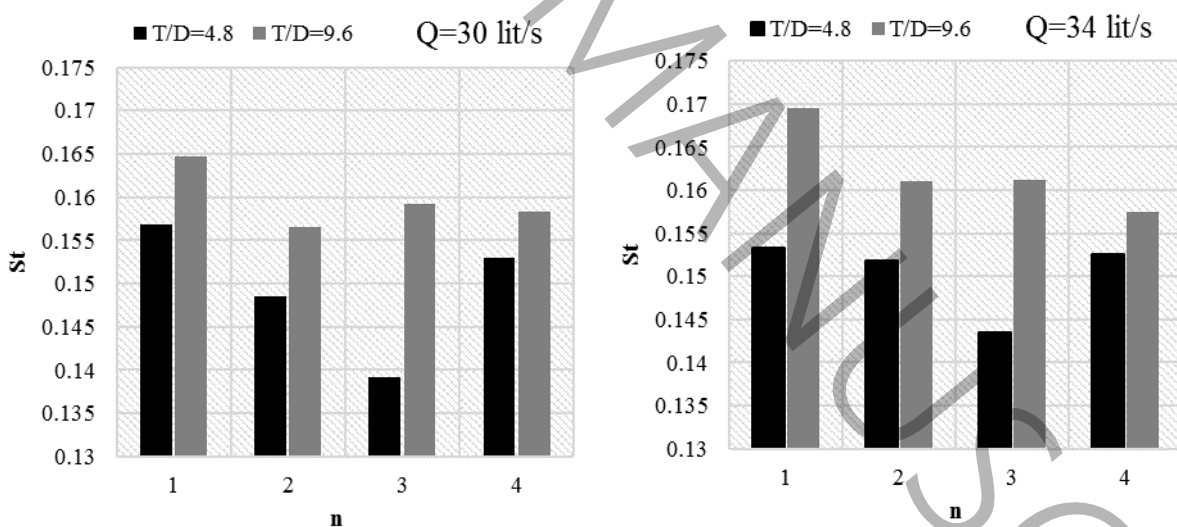
Table 2. A summary of hydraulic parameters for cubic obstacles in resonance

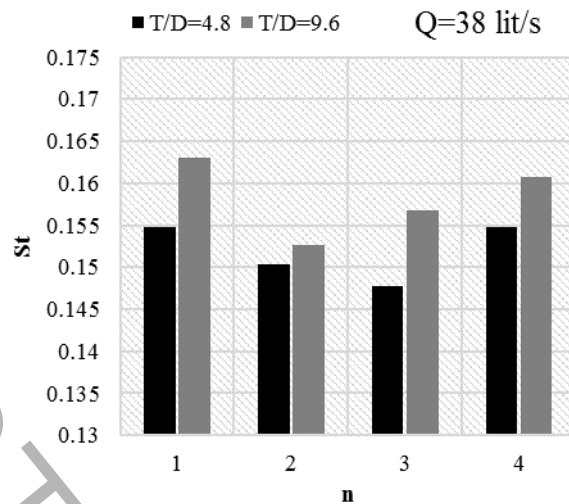
f_s (Hz)	H (mm)	n	T/D	Q (lit/s)	N
۰.۶۰۱	۲۵۰	۱			۱
۰.۹۱۱	۱۵۶	۲	۴/۸	۳۰	۲
۱.۱۴۵	۱۱۶	۳			۳
۱.۳۳۶	۱۰۹	۴			۴
۰.۶۲۰	۲۶۹	۱			۵
۰.۹۳۷	۱۷۶	۲	۴/۸	۳۴	۶
۱.۱۷۲	۱۳۳	۳			۷
۱.۳۷۳	۱۲۰	۴			۸
۰.۶۳۵	۲۹۶	۱			۹
۰.۹۵۹	۱۹۰	۲	۴/۸	۳۸	۱۰
۱.۲۰۲	۱۴۹	۳			۱۱
۱.۳۹۰	۱۳۵	۴			۱۲
۰.۶۱۱	۲۵۸	۱			۱۳
۰.۹۲۴	۱۶۲	۲			۱۴
۱.۱۷۳	۱۳۰	۳	۹/۶	۳۰	۱۵
۱.۳۷۳	۱۱۰	۴			۱۶
۰.۶۳۲	۲۹۱	۱			۱۷
۰.۹۵۳	۱۸۳	۲			۱۸
۱.۲۰۶	۱۴۵	۳	۹/۶	۳۴	۱۹
۱.۳۹۱	۱۲۳	۴			۲۰
۰.۶۴۴	۳۰۷	۱			۲۱
۰.۹۶۶	۱۹۲	۲			۲۲
۱.۲۱۷	۱۵۶	۳	۹/۶	۳۸	۲۳
۱.۴۰۴	۱۳۹	۴			۲۴

در جدول (۲)، پارامترهای هیدرولیکی موانع مکعبی با تغییر دبی جریان در حالت تشدید ارائه شده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد در هر نوع موج، عمق جریان مورد نیاز برای ایجاد حالت تشدید، با افزایش دبی جریان افزایش یافته است. می‌توان چنین تعبیر نمود که با افزایش دبی جریان، همپوشانی گردابه‌ها برای ایجاد موج در عمق بالاتری اتفاق می‌افتد بنابراین با افزایش دبی

جریان، حالت تشدید در عمق بالاتری اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال در فاصله عرضی ۱۲ سانتیمتر و موج نوع یک، حالت تشدید برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در عمق ۲۵۰ میلیمتر، برای دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه در عمق ۲۶۹ میلیمتر و برای دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه در عمق ۲۹۶ میلیمتر اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد برای هر فاصله عرضی، در هر دبی با افزایش شماره موج، حالت تشدید در عمق پایین‌تری تشکیل می‌شود به‌طوری‌که در هر دبی بیشترین عمق تشکیل شده مربوط به موج نوع یک و کمترین آن مربوط به موج نوع چهار می‌باشد. از دیگر نتایج این بخش می‌توان به رابطه بین فرکانس موج و دبی جریان اشاره کرد. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، فرکانس موج با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد. بنابراین فرکانس موج و دبی جریان باهم رابطه مستقیم دارند.

همان‌طور که عنوان شد، عدد استروهل، در تحلیل پدیده‌های تحت تأثیر گردابه و وابسته به زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۸ تغییرات عدد استروهل برای موانع مکعبی با تغییر فاصله عرضی بدون بعد نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله عرضی موانع (کاهش تراکم موانع)، عدد استروهل افزایش می‌یابد. می‌توان چنین گفت عدد استروهل وابسته به فرکانس موج و سرعت جریان می‌باشد، با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده شد در حالت تشدید، فرکانس موج و عمق جریان با فاصله عرضی رابطه مستقیم دارند (افزایش عمق جریان باعث کاهش سرعت جریان می‌شود)، بنابراین با افزایش فاصله عرضی، مقادیر فرکانس موج افزایش و سرعت جریان نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه با توجه به رابطه (۲)، افزایش فرکانس و کاهش سرعت جریان با افزایش فاصله عرضی موانع، باعث افزایش عدد استروهل می‌گردد. ویرو و همکاران [۹] در مطالعه خود بیان کردند عدد استروهل با افزایش تراکم موانع کاهش می‌یابد که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. با افزایش T/D از ۴/۸ به ۹/۶ بیشترین میزان درصد افزایش عدد استروهل، معادل ۱۴ درصد بود که مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و موج نوع سه می‌باشد و کمترین آن معادل ۱/۵ درصد بود که مربوط به دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع دو می‌باشد.





شکل ۸- تغییرات عدد استروهال (St) با تغییر فاصله عرضی بدون بعد (T/D) در دبی‌های مختلف

Fig. 8. Variations of Strouhal Number (St) by changing the dimensionless transversal distance (T/D) in different discharges

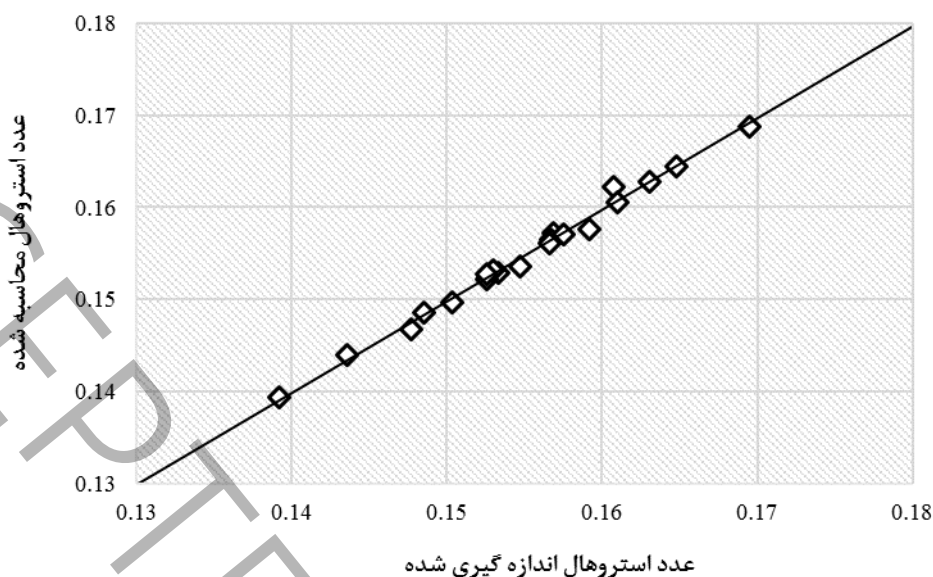
گام نهایی در تحقیق حاضر، پیش‌بینی رابطه عدد استروهال در حالت تشدید بود. با توجه به نتایج آنالیز ابعادی (رابطه ۵)، عدد استروهال در تحقیق حاضر تابعی از دامنه نسبی موج A/H ، فاصله عرضی بدون بعد T/D ، تعداد موانع در یک ردیف N ، نوع موج n و اعداد بدون بعد رینولدز مانع Re و فرود Fr می‌باشد. به دلیل اینکه تعداد موانع در یک ردیف اثر خود را در فاصله عرضی بدون بعد نشان می‌دهد، از رابطه ۵ حذف گردید و رابطه نهایی برای پیش‌بینی رابطه عدد استروهال به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$St = K \left(\frac{A}{H} \right)^a \left(\frac{T}{D} \right)^b (n)^c (Re)^d (Fr)^e \quad (6)$$

با استفاده از رگرسیون غیرخطی توسط نرم‌افزار SPSS Statistic 21 و داده‌های آزمایشگاهی ضرایب رابطه ۶ برای موانع مکعبی تعیین شد. بدین صورت که از مجموع آزمایش‌های انجام شده، ۸۵ درصد داده‌ها به منظور کالیبراسیون و تعیین ضرایب استفاده شدند و ۱۵ درصد داده‌ها که در کالیبراسیون مشارکت نداشتند به منظور صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت رابطه ۶ به صورت رابطه ۷ برای موانع مکعبی توسعه یافت. بر این اساس مجذور ضریب همبستگی رابطه ۷، ۰.۹۸ به دست آمد که اعتبار رابطه به دست آمده را تأیید می‌نماید.

$$St = 0.769 \left(\frac{A}{H} \right)^{0.078} \left(\frac{T}{D} \right)^{0.008} (n)^{0.546} (Re)^{-0.35} (Fr)^{-0.463} \quad (7)$$

به منظور بررسی میزان دقت معادله ۷، عدد استروهال اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها با عدد استروهال محاسبه شده از رابطه ۷ مقایسه شد که نتیجه این مقایسه در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به مقدار مجذور ضریب همبستگی R^2 معادله ۷ با کمترین میزان خطا تخمین زده شده است.



شکل ۹- مقایسه مقادیر عدد استروهل محاسبه شده و اندازه گیری شده
Fig. 9. Comparison of calculated and measured Strouhal Number values

نکته قابل توجه در خصوص معادله ۷ این است که تأثیر هر کدام از پارامترهای T/D , A/H , n , Re و Fr روی عدد استروهل St به چه میزان است. بنابراین آنالیز حساسیت پارامترها برای معادله ۷ انجام شد. بدین صورت که در ابتدا میزان R^2 ، خطای $RMSE$ و خطای MAE برای معادله ۷ مشخص گردید و در هر مرحله با حذف هر کدام از پارامترهای T/D , A/H , n , Re و Fr از معادله ۷، میزان R^2 ، خطای $RMSE$ و MAE محاسبه گردید و با معادله ۷ مقایسه شد. برای این منظور از ۱۵ درصد داده‌ها که برای صحت-سنجی مورد استفاده قرار گرفته بودند، استفاده شد. در جدول ۳ نتیجه نهایی آنالیز حساسیت برای معادله ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود که تأثیر پارامتر عدد رینولدز Re بر عدد استروهل از سایر پارامترها بیشتر است و با حذف این پارامتر از معادله ۷، R^2 ۴۶ درصد کم می‌شود و خطای $RMSE$ و MAE به‌طور متوسط دو برابر می‌شود.

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت برای معادله ۷
Table 3. Sensitivity analysis results for Eq. 7

MAE	RMSE	R^2	معادله
۰٫۰۰۱۲	۰٫۰۰۱۶	۰٫۹۸	معادله ۷
۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۰۱۹	۰٫۹۳	معادله ۷ بدون A/H
۰٫۰۰۱۲	۰٫۰۰۱۴	۰٫۹۷	معادله ۷ بدون T/D
۰٫۰۰۲۵	۰٫۰۰۳۴	۰٫۶۸	معادله ۷ بدون n
۰٫۰۰۲۷	۰٫۰۰۳۵	۰٫۵۲	معادله ۷ بدون Re
۰٫۰۰۲۴	۰٫۰۰۲۵	۰٫۸۱	معادله ۷ بدون Fr

۴- نتیجه گیری

هنگامی که جریان آب به موانع موجود در مسیر جریان برخورد می‌کند، اغتشاشی موسوم به گردابه ایجاد می‌شود. با هم‌فرکانس شدن فرکانس ناشی از گردابه موانع با فرکانس طبیعی نوسانات سازه پدیده تشدید رخ می‌دهد و امواج عرضی با طول موج‌های متفاوت

به شکل منظم در کانال تشکیل می‌شود. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی با آرایش زیگزاگ بر خصوصیات امواج عرضی در یک فلوم عریض پرداخته شد. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

رژیم جریان در آزمایش‌ها، زیر بحرانی و آشفته بود و در حالت تشدید، عدد رینولدز مانع و عدد فرود به ترتیب در محدوده $2319 < Re < 5627$ و $0.21 < Fr < 0.55$ بود.

با افزایش فاصله عرضی موانع، دامنه نسبی موج افزایش یافت و بیشترین میزان دامنه نسبی موج تشکیل شده در آزمایش‌ها، برابر ۳۳ درصد برای $T/D=9.6$ ، موج نوع چهار و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود.

در هر نوع موج عمق جریان مورد نیاز برای ایجاد حالت تشدید، با افزایش دبی جریان افزایش یافت و در هر دبی با افزایش شماره موج، حالت تشدید در عمق پایین‌تری تشکیل شد. همچنین فرکانس موج نیز با افزایش دبی جریان افزایش یافت. با استفاده از تحلیل ابعادی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رابطه‌ای به منظور تعیین عدد استروهال در حالت تشدید ارائه گردید.

۵- تشکر و قدردانی

در پایان از حمایت مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1400.86).

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	دامنه موج، m
b	عرض فلوم، m
D	قطر پایه، m
Fr	عدد فرود
f_n	فرکانس طبیعی در کانال، Hz
f_s	فرکانس ناشی از گردابه موانع، Hz
g	شتاب گرانش، m/s^2
H	عمق متوسط جریان، m
N	تعداد موانع در یک ردیف
n	نوع موج
P	فاصله بین ردیف‌های موانع، m
Q	دبی جریان ورودی، m^3/s
Re	عدد رینولدز مانع
St	عدد استروهال
T	فاصله بین موانع در یک ردیف، m
U	سرعت متوسط جریان، m/s

علائم یونانی

λ	طول موج، m
ρ	جرم واحد حجم مایع، Kg/m^3
μ	لزجت دینامیکی سیال، Kg/ms

- [1] N. Shahkarami, E. Moghaddasi, Experimental Investigation of the Characteristics of Surface Oscillations due to Passing flow Through Rigid Vegetation, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(5) (2018) 827-834 (in Persian).
- [2] L. Zima, N.L. Ackermann, Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6) (2002) 596-603.
- [3] F.M. White, *Fluid mechanics*, Tata McGraw-Hill Education, 1979.
- [4] A. Jafari, M. Ghomeshi, M. Bina, S.M. Kashefipour, Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels, *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(2) (2010) 949-955.
- [5] N. Poustizadeh, M. Ghomeshi, Experimental Study on the Effect of Transverse Waves on Suspended Sediment Concentration at Downstream of Obstacles in a Staggered Arrangement, *Water and Soil Science*, 26(2-1) (2016) 87-100 (in Persian).
- [6] S. Mostafavi, M. Ghomeshi, B. Shahmoradi, Resonance Frequency of Transverse Waves Due to Vortex Shedding of Obstacles with Different Arrangements, *Water and Soil Science*, 27(1) (2017) 147-157 (in Persian).
- [7] M.H. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S.H. Mosavi Jahromi, S.M. KashefiPour, M. Fathi Moghadam, The study of impact of obstacle shape on the characteristics of transverse waves, *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(1) (2016) 11-20 (in Persian).
- [8] K. Zhao, N.-S. Cheng, Z. Huang, Experimental study of free-surface fluctuations in open-channel flow in the presence of periodic cylinder arrays, *Journal of Hydraulic Research*, 52(4) (2014) 465-475.
- [9] D.P. Viero, I. Pradella, A. Defina, Free surface waves induced by vortex shedding in cylinder arrays, *Journal of Hydraulic Research*, 55(1) (2017) 16-26.
- [10] W. Rahmeyer, J.M. Clegg, S.L. Barfuss, Canal Wave Oscillations from Expansion of I-84 Bridge in Boise, Idaho, *Transportation research record*, 2309(1) (2012) 200-205.
- [11] Z. Soltani-Kazemi, M. Ghomeshi, M.B. Yarahmadi, Experimental study of local scour around diamond bridge piers subject to transverse standing waves, *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3) (2022) 101598.
- [12] Z. Kang, L. Jia, An experiment study of a cylinder's two degree of freedom VIV trajectories, *Ocean Engineering*, 70 (2013) 129-140.
- [13] R.D. Blevins, *Flow-induced vibration*, New York, (1977).
- [14] R.A. Falconer, Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels, *Journal of Applied sciences*, 7(24) (2007) 3927-3934.
- [15] M. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S. Musavi, Impact of Prismatic-Shaped Obstacle on the Characteristics of Transverse Waves, (2015) (in Persian).