



بررسی آزمایشگاهی خصوصیات نوسانات سطحی حاصل از عبور جریان از میان پوشش گیاهی صلب

نازنین شاه کرمی^{۱*}، احسان مقدسی^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

^۲ دانش آموخته دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۰ خرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۷ مرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۱ آبان ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۴ آبان ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:
جریان در کانال روپاز
پوشش گیاهی صلب
انتشار ورتکس
نوسانات عرضی
خصوصیات نوسانات سطحی

چکیده: در اثر عبور و برخورد جریان با پوشش گیاهی، در بالادست گیاه ناحیه پرفشار و در پایین دست ناحیه کم فشار تشکیل می‌گردد. وجود این اختلاف فشار، موجب جدایی لایه مرزی و به دنبال آن تشکیل گردابه در پایین دست پوشش گیاهی می‌شود. با برابر شدن فرکانس انتشار ورتکس از پوشش گیاهی و فرکانس طبیعی مجرا، موج و نوسان سطحی ایستا در جهت عمود بر مسیر اصلی جریان تشکیل خواهد شد. در مجاری طبیعی در قسمت‌هایی که سرعت جریان کم است، احتمال رشد گیاهان زیاد است، بدین ترتیب همیشه جریانی آزاد در کنار جریانی که از میان گیاهان می‌گذرد وجود خواهد داشت. در تحقیق حاضر به مقایسه‌ی خصوصیات نوسانات سطحی و عرضی جریان ناشی از پوشش گیاهی (موانع صلب) در حالت‌های مختلفی که موانع درصدهای متفاوتی از عرض مجرا را پوشانده‌اند، پرداخته شده است. در این پژوهش ۳۷۸ آزمایش در یک کانال مستطیلی به طول ۹ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. دبی جریان در آزمایش‌ها بین ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه متغیر بود. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، نوسانات عرضی در عمق‌های بزرگتر تشکیل می‌گردد که دارای دامنه‌ی نوسان بزرگتری نیز هستند. همچنین در یک عمق جریان ثابت با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، دامنه‌ی نوسان افزایش پیدا نمود. در نهایت با استفاده از آنالیز ابعادی و تحلیل آماری، روابطی جهت پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی نوسانات عرضی با دخالت درصد عرض پوشیده شده از موانع استخراج شد؛ همچنین صحت روابط پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفت.

۱- مقدمه

گسترش و انتشار گردابه پدیده‌ای است که در سرتاسر جهان هستی قابل مشاهده است. ورتکس^۱ یا گردابه بر اثر فعل و انفعال بین یک سیال و یک سازه‌ی فیزیکی صورت می‌پذیرد. به طور کلی انتشار گردابه به سبب جدایی لایه مرزی از بدنه‌ی مانع موجود در مسیر جریان بوده و می‌تواند در هر مقیاسی صورت پذیرد. گردابه‌ها از طرفین جسم یک در میان (یک مرتبه سمت راست و یک مرتبه سمت چپ) شکل گرفته و به سمت پایین دست حمل و منتشر می‌شوند. در این شرایط اگر فرکانس انتشار گردابه با فرکانس طبیعی جسم برابر و منطبق باشد، لرزش و نوسان جسم را به دنبال خواهد داشت. ارتعاش ناشی از انتشار گردابه، سازه‌ها را به سمت خستگی و تخریب سوق می‌دهد. نوسان و ارتعاش مداوم سازه سرانجام به شکست و تخریب آن خواهد انجامید. یک مثال معروف از شکست سازه بر اثر انتشار گردابه پل تاکوماناروز می‌باشد، که در آن ارتعاش سازه همراه با افزایش دامنه سبب شکست و فروریختن پل گردید [۱].

موضوع انتشار گردابه به خاطر اهمیت مهندسی‌اش تاکنون به طور

وسعی در علوم متنوعی همچون میکروهوشناسی، مدل‌سازی پخش آلودگی، ابزارهای اندازه‌گیری دبی جریان استفاده شده است. با توجه به محل‌های مستعد و عوامل ایجاد امواج عرضی و با شناخت این موج و پیش‌بینی زمان، مکان و میزان تشکیل آن، می‌توان از قدرت آن جهت استحصال انرژی الکتریکی و یا کمک به ته‌نشین شدن بار معلق استفاده نمود و از خاصیت مخرب آن همچون تغییر شکل بستر جریان، آبستتگی موضعی و یا آبستتگی پایه پُل جلوگیری کرد. هرچه دامنه موج بزرگتر و فرکانس انتشار آن کوچکتر باشد قدرت موج حاصل و لذا تأثیرگذاری آن بر سازه‌های پیرامون خود بیشتر می‌گردد و از این جهت است که از بین متغیرهای وابسته به موج عرضی، اهمیت بیشتری به بررسی دامنه نسبی آن داده شده است [۴-۱].

زمانی که یک جریان ماندگار آب از میان مجموعه‌ای از موانع استوانه‌ای عبور می‌کند، نوسان و انتشار گردابه رخ می‌دهد که در نتیجه‌ی آن امواج سطحی عرضی تشکیل خواهد شد. این موانع استوانه‌ای در یک فلوم آزمایشگاهی می‌توانند مقیاسی از یک سری پایه‌ی پل موجود در مسیر جریان، پوشش گیاهی و ساقه‌های گیاهان در سیلابدشت رودخانه‌ها، پایه‌ها و ستون‌های یک اسکله یا ایستگاه پمپاژ در ساحل رودخانه باشند [۲]. تاکنون

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n-shahkarami@araku.ac.ir

۱۲ و ۲۵ میلی‌متر استفاده نمودند. عدد رینولدز مانع بین ۱۵۲ تا ۵۹۸۶ قرار داشت. آنها ۱۰ مُد مختلف موج را مشاهده نمودند. حداکثر دامنه موج برابر ۴۰٪ عمق متوسط جریان حاصل شد. سرکار^[۴] در آزمایش‌های خود مشاهده کرد که حداکثر دامنه موج تقریباً در یک‌پنجم ابتدایی طول محل قرارگیری موانع در کانال رُخ می‌دهد. دفینا و پرادلا^[۷] با استفاده از نتایج سایر محققین و مدل‌های ریاضی، رابطه‌ی دامنه‌ی نسبی موج را ارائه کردند. ویر^[۸] و همکاران با هدف بررسی دقیق پدیده‌ی موج عرضی، بدین نتیجه رسیدند که موج حاصل از برخورد جریان با موانع، تنها یک نوسان سطحی یا یک موج عرضی خالص نبوده و نوعی موج متاکرونال^[۹] (مانند موج مکزیکی معروف در میان تماشاچی‌های فوتبال) است؛ همچنین عدد استروهل^[۱۰] به نحوه‌ی چینش موانع و تراکم آن‌ها بستگی دارد. عدد استروهل در چینش زیگزاگی بیشتر از چینش موازی است و هرچه تراکم موانع بیشتر باشد، عدد استروهل موج کوچک‌تر خواهد بود. پورمحمدی و همکاران^[۹] با تغییر شکل موانع موجود در جریان به صورت‌های مربعی، مثلثی و لوزی و تغییر در فاصله‌های طولی و عرضی بین موانع، به بررسی خصوصیات امواج عرضی و مقایسه آن‌ها در شرایط مختلف پرداختند. در ادامه، شاهمردی و همکاران^[۱۰] و مصطفوی و همکاران^[۱۱] به بررسی خصوصیات نوسانات عرضی جریان پس از عبور از میان موانع مربعی و مثلثی مستغرق پرداختند و رابطه‌هایی به منظور پیش‌بینی نسبت دامنه‌ی موج در حالت مستغرق و آزاد ارائه نمودند.

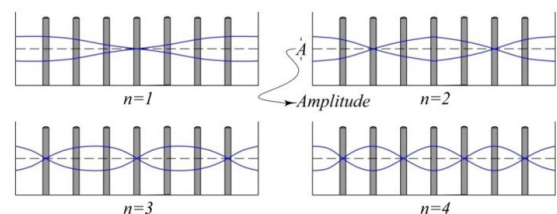
در تمام تحقیقات بررسی شده فوق‌الذکر، رابطه‌ای برای پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی نوسانات عرضی بر اساس خصوصیات موج، مشخصات موانع و اعداد بدون بعد استروهل یا فرود ارائه گردیده است. در همه این بررسی‌ها، رابطه برای شرایطی حاصل شده که کل عرض کانال در طولی مشخص، از موانع پوشیده شده باشد. در تحقیق حاضر سعی گردیده است تأثیر درصد عرض جریان مانع‌گذاری شده نیز، روی دامنه‌ی نسبی نوسان عرضی دخالت داده شود. ایده‌ی این هدف از این واقعیت نشأت گرفته است که در مجراهای طبیعی مانند رودخانه‌ها به علت کمتر بودن سرعت جریان در کناره‌ها نسبت به قسمت میانی، احتمال رشد گیاهان در این بخش‌ها زیاد است. بنابراین همیشه در مجاورت جریانی که از میان پوشش گیاهی عبور می‌کند، یک جریان آزاد وجود دارد.

۲- مواد و روش‌ها:

۲-۱- مراحل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک در یک فلوم به طول ۹ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر و

تحقیقات زیادی در زمینه‌ی مسأله انتشار گردابه از موانع موجود در مسیر جریان و نوسانات سطحی ناشی از آن صورت پذیرفته است که از آن بین می‌توان به پژوهش شوستر^[۳] روی ساخت مدل فیزیکی از پُل و کانال دلتا مندوتا^[۲]، جهت مطالعه نوسانات عرضی تولید شده در اثر وجود پایه‌های پل در کانال اشاره نمود. او در تحقیق خود سعی نمود تا با یافتن منشأ این امواج عرضی و پیشنهاد سازه‌ای اصلاحی، اثرات مخرب موج را کاهش و آن را به طور کامل حذف نماید. زیما و آکرمن^[۳] با انجام آزمایش‌های متعدد در دو فلوم شیبدار با ابعاد مختلف و با استفاده از موانع استوانه‌ای چوبی با قطرهای ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلی‌متر، به بررسی امواج عرضی عمود بر مسیر جریان ناشی از گردابه منتشر شده از برخورد جریان با موانع در دو مُد I و II پرداختند. آنها آزمایشات خود را در محدوده عدد رینولدز استوانه ۸۶۸ تا ۱۲۱۷۵ هدایت نمودند، زیرا معتقد بودند شرط لازم جهت تشکیل موج عرضی قرار داشتن عدد رینولدز مانع در محدوده ی ۴۰ تا ۳۰۰۰۰۰ می‌باشد. قمشی^[۴] و همکاران^[۵] آزمایشات خود را با یک فلوم به عرض ۱/۲ متر و طول ۱۲ متر انجام دادند. آنها کانال آزمایشگاهی را جهت بررسی تشکیل موج در عرض‌های متفاوت کانال، به دو قسمت به ابعاد ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر تقسیم نموده، بنابراین در عمل با سه عرض فلوم آزمایش‌های خود را انجام دادند. شیب کانال مورد استفاده نیز ثابت و برابر ۰/۰۰۱ بود. برای موانع، از میله‌های استوانه‌ای شکل چوبی به قطر ۲۴ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده کردند. استوانه‌ها را در کف فلوم در فواصل مختلف و با چینش‌های موازی و زیگزاگی پیچ نمودند. در آزمایشات آنها ارتفاع دریاچه خروجی فلوم از یک مقدار حداکثر به حداقل متغیر بوده و در آزمایش‌های خود چهار نوع موج عرضی را مشاهده نمودند (شکل ۱).



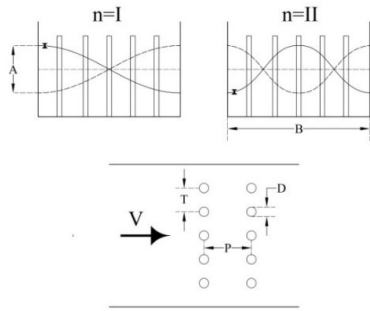
شکل ۱: مُد موج‌های ظاهر شده در فلوم آزمایشگاهی [۵]

Fig. 1. Different modes of waves appearing in the laboratory flume

اعداد رینولدز در این آزمایشات در محدوده ۱۰۰۰ تا ۴۴۰۰ قرار داشته و حداکثر دامنه‌ی موج مشاهده شده، ۴۰٪ عمق متوسط جریان بود. جعفری و همکاران^[۶] در مطالعه آزمایشگاهی خود از سه قطر مختلف مانع ۵،

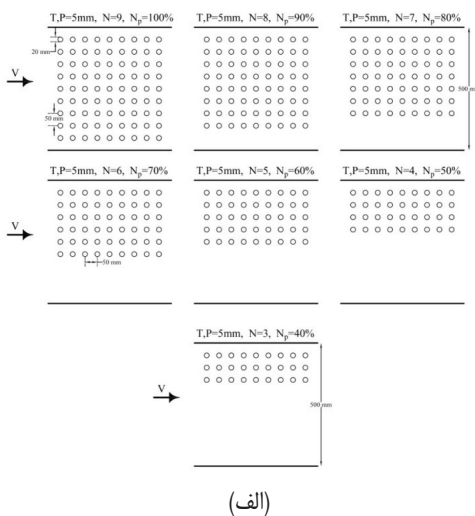
6 Sarkar
7 Defina and Pradella
8 Viero
9 Metachronal
10 Strouhal

1 Schuster
2 Delta Mendota
3 Zima and Ackermann
4 Ghomeshi
5 Jafari

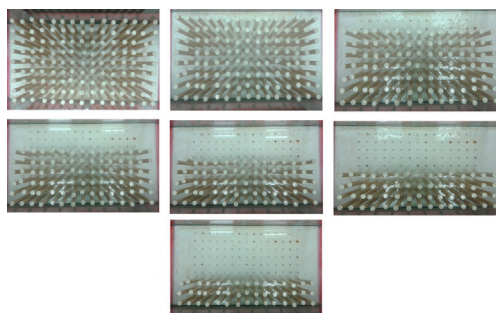


شکل ۳: شماتیک مُدهای مختلف تشکیل شده در این تحقیق

Fig. 3. Schematic modes of waves appearing in this study



(الف)

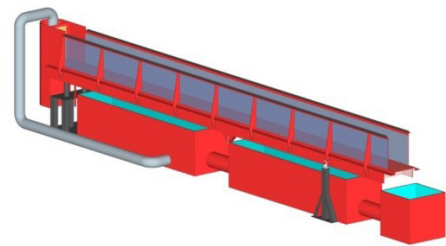


(ب)

شکل ۴: چینش موانع در مراحل مختلف آزمایش به صورت شماتیک (الف) و در آزمایشگاه (ب) (T فاصله بین موانع در عرض کانال، P فاصله بین موانع در طول کانال، N تعداد موانع در یک ردیف از عرض کانال، N_p درصد پوشیده شده از موانع کانال)

Fig. 4. Obstacles arrangements considered in different experiments schematically (a) and in a laboratory (b) (T and P denote, respectively, the transverse and the longitudinal distances between barriers, N is the number of obstacle rows in the transverse direction, N_p is width percentage covered by obstacles)

شیب ثابت ۰/۰۰۱ انجام پذیرفت شکل ۲ در طول آزمایش‌ها دبی جریان که بین ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه متغیر بود، توسط یک پمپ تأمین و به وسیله یک دبی‌سنج التراسونیک قرائت می‌گردید. به منظور شبیه‌سازی پوشش گیاهی، ۱۳۵ عدد استوانه از جنس ارتالن^۱ به قطر (D) برابر ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر، به وسیله‌ی پیچ و مهره در یک متر میانی کف فلوم چیده شد. فاصله‌ی طولی (P) و عرضی (T) موانع در تمام مراحل آزمایش ثابت و برابر ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور ثبت عمق متوسط جریان و دامنه‌ی نوسان از سه ارتفاع سنج با دقت میلی‌متر و به منظور اندازه‌گیری فرکانس موج نیز از یک کرنومتر با دقت هزارم ثانیه استفاده گردید.

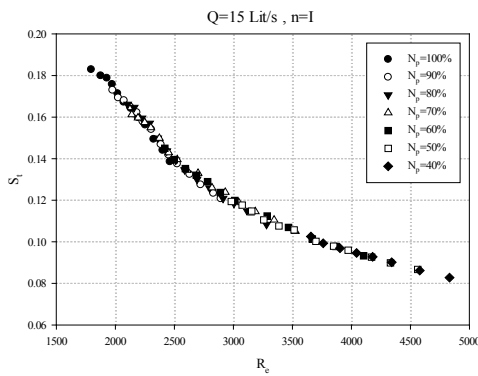


شکل ۲: فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر

Fig. 2. The laboratory flume used in this study

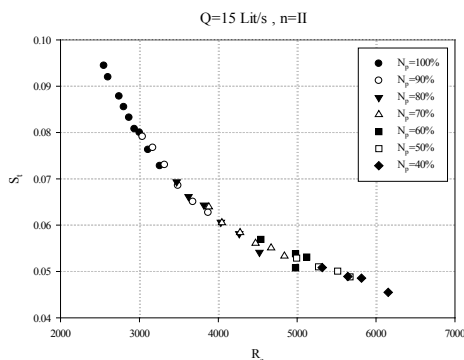
در ابتدای آزمایش، دریچه‌ی انتهایی فلوم را بسته تا سطح آب تا حدی که ارتفاع فلوم اجازه دهد (حدود ۴۵ سانتی‌متر) بالا آید. سپس دریچه با گام‌های پنج میلی‌متری باز می‌گردید تا نوسان عرضی در سطح آب مشاهده شود. در این مرحله به جریان فرصت داده می‌شد تا دامنه و فرکانس نوسان ثابت شود، آنگاه این مشخصات ثبت می‌گردید. عمل افزایش سرعت جریان، با باز نمودن تدریجی جریان، تا جایی ادامه می‌یافت که مُد موج از نوع I به II تغییر یابد. شماتیک مُدهای مختلف تشکیل شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در مراحل مختلف آزمایش درصد عرض پوشیده شده از موانع (N_p) که معرف گیاهان صلب می‌باشند با ۷ چینش متفاوت، مطابق شکل ۴ تغییر یافته و نتایج ثبت گردید.

رینولدز مانع، عدد استروهل ورتکس منتشر شده از یک مانع را مقدار تقریباً ثابت 0.2 بدست آورده‌اند. فیتزها برای یک گروه از موانع، آرایش، قطر و فاصله قرارگیری موانع را نیز بر عدد استروهل دخیل دانسته است. دلایل این عدم تطابق احتمالاً به دلیل آن است که بررسی‌های آنها مربوط به سیال گاز بوده است. جعفری و همکارانش [۱۴] تاثیر فواصل طولی و عرضی موانع، آرایش موانع و عدد رینولدز بر عدد استروهل جریان آب را در حالتی که کل عرض کانال از موانع پوشیده شده، بررسی کرده‌اند. در بخشی از نتایج آنها که مشابه با این تحقیق، نسبت فاصله طولی و عرضی به قطر مانع برابر $2/4$ بوده (این نسبت در تحقیق حاضر $2/5$ است) در دامنه عدد رینولدز مشابه، عدد استروهل روند نزولی داشته که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی کامل دارد. کاهش عدد استروهل با افزایش عدد رینولدز را می‌توان ناشی از آن دانست که با افزایش سرعت متوسط جریان و تلاطم شدن انتشار ورتکس، فرکانس موج کاهش یافته و در نتیجه عدد استروهل کاهش می‌یابد.



شکل ۵: رابطه‌ی بین اعداد بی‌بعد رینولدز و استروهل در موج مد I

Fig. 5. Relationship between Reynolds and Strouhal dimensionless numbers in wave mode I



شکل ۶: رابطه‌ی بین اعداد بی‌بعد رینولدز و استروهل در موج مد II

Fig. 6. Relationship between Reynolds and Strouhal dimensionless numbers in wave mode II

از پارامترهایی که بر دامنه‌ی نسبی موج عرضی (A/H) مؤثر هستند، می‌توان دامنه نوسان (A)، بسامد موج (f_s)، مد موج (n)، طول موج (λ)، عرض کانال (B)، فرکانس طبیعی کانال (f)، عمق متوسط جریان (H)، تعداد موانع در یک ردیف از عرض کانال (N)، درصد پوشیده شده از موانع کانال (N_p)، سرعت متوسط جریان (V)، قطر مانع (D)، ارتفاع مانع (h)، فاصله‌ی بین موانع در طول کانال (P)، فاصله بین موانع در عرض کانال (T)، شتاب گرانشی زمین (g) و لزجت سینماتیک سیال (ν) را نام برد. بنابراین، متغیرهای حاکم بر پدیده‌ی موج عرضی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه نمود.

$$f(A, f_s, n, \lambda, B, f, H, N, N_p, V, D, h, P, T, g, \nu) = 0 \quad (1)$$

با تحلیل ابعادی و بر اساس روش پی‌باکینگهام^۱، رابطه‌ی ۱ به صورت رابطه‌ی ۲ بازنویسی گردید.

$$f(Fr, Re, St, Ur, A/H, D/B, D/P, D/T, D/h, f/f_s, n, N, N_p) = 0 \quad (2)$$

متغیرهای بدون بعد استفاده شده شامل عدد فرود (Fr)، عدد رینولدز موانع (Re)، عدد استروهل (St) و عدد اورسل^۲ (Ur) به ترتیب طبق روابط ۳ تا ۶ تعریف می‌شوند:

$$Fr = V/\sqrt{gH} \quad (3)$$

$$Re = VD/\nu \quad (4)$$

$$St = (f_s D)/V \quad (5)$$

$$Ur = (A\lambda^2)/H^3 \quad (6)$$

۳- نتایج و بحث

آزمایش‌ها در ۱۴ مرحله، ۷ چینش متفاوت با دو نوع مد I و II در هر چینش، انجام پذیرفت. در جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج مراحل مختلف آزمایش‌ها و محدوده‌ی تغییرات پارامترهای بی‌بعد وابسته ارائه شده است. رابطه‌ی بین اعداد بی‌بعد رینولدز و استروهل در مدهای I و II امواج عرضی با استفاده از شکل‌های ۵ و ۶ ارزیابی گردید. عدد رینولدز مانع در محدوده‌ی ۱۰۵۱ تا ۶۱۵۴ و عدد استروهل بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۶ قرار گرفت. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است، با افزایش عدد رینولدز، عدد استروهل کاهش یافته است. مقایسه این بخش از نتایج با تحقیقاتی که به تاثیر متقابل این دو عدد بی‌بعد نسبت بهم در گازها پرداخته‌اند مانند تحقیقات لینهارد^۳ [۱۲] و فیتزها^۴ [۱۳] همخوانی ندارد. چرا که آنها در این بازه از عدد

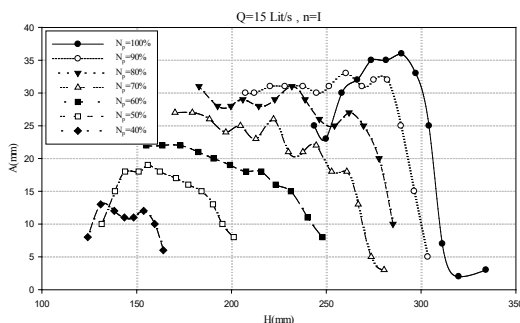
- 1 π -Buckingham
- 2 Ursell
- 3 Lienhard
- 4 Fitz-hugh

جدول ۱: خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌ها (n: مُد موج، N_p : درصد پوشیده شده از موانع کانال، A_{max} : دامنه نوسان حداکثر موج، Fr: عدد فرود، Re: عدد رینولدز و St: عدد استروهل)

Table 1. Summary of test results (n: wave mode, N_p is width percentage covered by obstacles, A_{max} : maximum wave amplitude, Fr: Froude number, Re: Reynolds number and St: Strouhal number)

ردیف	تعداد	n	(%) N_p	A_{Max} (mm)	Fr	Re	St
۱	۳۵	I	۱۰۰	۳۶	۰/۰۴ - ۰/۰۸	۱۰۵۱ - ۲۴۶۲	۰/۰۸ - ۰/۳۶
۲	۳۰	II	۱۰۰	۴۹	۰/۰۸ - ۰/۱۶	۱۷۷۳ - ۳۳۸۵	۰/۰۷ - ۰/۱۵
۳	۳۸	I	۹۰	۳۳	۰/۰۴ - ۰/۱	۱۱۵۱ - ۲۸۹۴	۰/۱۲ - ۰/۳۴
۴	۲۲	II	۹۰	۳۶	۰/۰۸ - ۰/۱۶	۱۷۷۳ - ۳۸۷۱	۰/۰۶ - ۰/۱۵
۵	۳۸	I	۸۰	۳۱	۰/۰۵ - ۰/۱۲	۱۲۷۷ - ۳۲۸۲	۰/۱۱ - ۰/۳۱
۶	۲۰	II	۸۰	۳۱	۰/۱۳ - ۰/۲۲	۲۳۷۲ - ۴۵۲۳	۰/۰۵ - ۰/۱۲
۷	۳۹	I	۷۰	۲۷	۰/۰۵ - ۰/۱۴	۱۳۲۳ - ۳۵۲۶	۰/۱۱ - ۰/۳۰
۸	۱۸	II	۷۰	۶۴	۰/۱۶ - ۰/۲۴	۲۶۹۷ - ۴۸۳۹	۰/۰۵ - ۰/۱۰
۹	۳۸	I	۶۰	۲۳	۰/۰۷ - ۰/۱۷	۱۵۳۵ - ۴۱۰۵	۰/۰۹ - ۰/۲۶
۱۰	۱۷	II	۶۰	۲۷	۰/۱۸ - ۰/۲۷	۳۰۰۰ - ۵۱۲۱	۰/۰۵ - ۰/۰۹
۱۱	۳۰	I	۵۰	۱۹	۰/۰۹ - ۰/۲۰	۱۸۵۲ - ۴۵۶۳	۰/۰۹ - ۰/۲۳
۱۲	۱۶	II	۵۰	۲۰	۰/۲۰ - ۰/۳۱	۳۱۴۱ - ۵۶۶۹	۰/۰۵ - ۰/۰۹
۱۳	۱۶	I	۴۰	۱۳	۰/۱۳ - ۰/۲۲	۲۳۹۵ - ۴۸۳۲	۰/۰۸ - ۰/۲۰
۱۴	۲۱	II	۴۰	۱۳	۰/۱۹ - ۰/۳۴	۳۰۹۳ - ۶۱۵۴	۰/۰۵ - ۰/۰۹
جمع	۳۷۸	I,II	-	۶۴	۰/۰۴ - ۰/۳۴	۱۰۵۱ - ۶۱۵۴	۰/۰۵ - ۰/۳۶

روند افزایش دامنه‌ی نوسان با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، برای دبی‌های مختلف تقریباً مقداری ثابت است.



شکل ۷: رابطه‌ی بین دامنه و عمق متوسط جریان در موج مُد I

Fig. 7. Relationship between amplitude and flow depth in wave mode I

رابطه‌ی بین دامنه موج و عمق متوسط جریان در موج مُد I و II به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با بررسی این شکل‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش درصدی از عرض کانال که از موانع پوشیده شده، نوسانات عرضی در عمق متوسط بیشتری از جریان مشاهده می‌شوند. همچنین قابل مشاهده است که در یک عمق جریان ثابت، با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، دامنه‌ی نوسانات نیز افزایش می‌یابد. نتیجه اخیر در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشهودتر است. می‌توان چنین تعبیر نمود زمانی که عرض کمی از آبراهه توسط موانع اشغال شده است، جریان آزادی که از کنار مجموعه موانع موجود در جریان می‌گذرد اجازه‌ی نوسان به موج عرضی تشکیل شده احتمالی را نمی‌دهد. حال هر چه عرض پوشیده شده از موانع بیشتر باشد، جریان آزاد از عرض کمتری عبور کرده و قدرت مقابله با موج را ندارد لذا دامنه‌ی موج بزرگتر خواهد بود. ضمن آنکه با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، درگیری و برخورد جریان با موانع و به دنبال آن میزان انتشار ورتکس بیشتر می‌شود. بنابراین تعداد ورتکس‌هایی که باهم جمع و تشکیل موج را می‌دهند بیشتر شده و نوسان‌های عرضی با دامنه‌ی بزرگتری را تشکیل می‌دهند. همچنین شکل ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که

گام نهایی در این تحقیق، پیش‌بینی رابطه دامنه‌ی نسبی موج عرضی از میان موانع بود. با استفاده از نود درصد داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزار SPSS، دامنه‌ی نسبی نوسانات عرضی جریان عبوری از میان موانع بر اساس سایر متغیرهای تاثیرگذار بر آن که در رابطه ۲ آمده‌اند، برای نوسانات مد I و II مطابق رابطه‌های ۷ و ۸ حاصل شد. لازم به ذکر است با توجه به آنکه شرط لازم برای وقوع پدیده‌ی تشدید، برابر شدن بسامد انتشار و رتکس از موانع با بسامد طبیعی کانال است [۳]، مقدار نسبت f_s/f در رابطه‌ی ۲ برابر یک در نظر گرفته شده و تعدادی از پارامترها هم به دلیل کم اهمیت تشخیص دادن آنها (نداشتن ضریب همبستگی مناسب با دامنه نسبی A/H از سوی نرم‌افزار SPSS) حذف گردیدند.

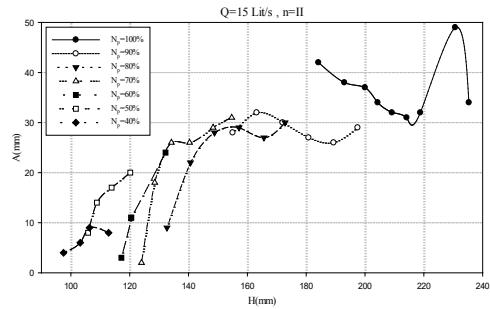
$$A/H = 0.215 N_p^{1.25} Re^{(-0.34)} St^{(-1)} Ur^{0.42} \quad (7)$$

$$A/H = 30 N_p^{0.67} Re^{(-1)} St^{(-1)} Ur^{0.50} \quad (8)$$

به منظور صحت سنجی روابط، از ده درصد مابقی داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. بر این اساس، مجذور ضریب همبستگی رابطه‌ی ۷، 0.91 و رابطه‌ی ۸ برابر 0.99 به دست آمد که اعتبار روابط بدست آمده را تأیید می‌نماید.

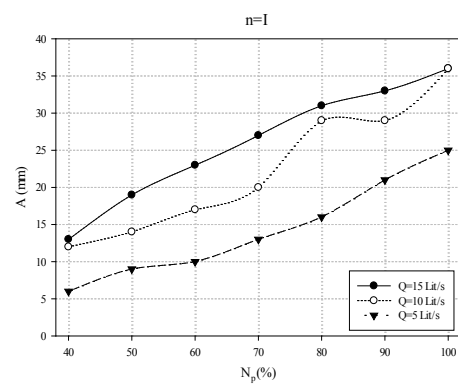
به منظور مقایسه روابط حاصل از تحقیق حاضر با روابط پیشنهادی زیما و اکرمین [۷] و قمشی و همکاران [۵]، داده‌های دامنه‌ی نسبی نوسانات عرضی مشاهداتی این پژوهش با داده‌های حاصل از روابط ارائه شده از دو تحقیق دیگر نیز مقایسه شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). این مقایسه نشان داد که هرچند داده‌های مشاهداتی با داده‌های شبیه‌سازی شده از روابط این تحقیق تطابق خوبی دارند، اما با روابط زیما و اکرمین [۲] و قمشی و همکاران [۵] تطابق قابل قبولی ندارند؛ هرچند اختلافات با نتایج تحقیق قمشی به خصوص در مد I کمتر است.

قابل توجه است که بین کلیه‌ی پژوهش‌های انجام شده تاکنون، همانطور که در گزارش پژوهش دفینا و پرادلا [۷] و سرکار [۴] اشاره و بررسی شده، داده‌های آزمایشگاهی یک محقق با رابطه‌ی پیشنهادی هیچ محقق دیگری با یکدیگر همخوانی و قرابت نداشته است و دلایل متعددی برای این اختلاف همچون تفاوت در قطر موانع، ابعاد فلوم و شرایط آزمایشگاهی از یک سو و از سوی دیگر تفاوت متغیرهای مهم تاثیر گذار و مورد بررسی بر این پدیده توسط محققین مختلف ذکر شده‌است. در تحقیق حاضر نیز دلیل بخشی از این اختلاف را می‌توان تفاوت در ابعاد و شرایط آزمایشگاهی و دلیل بخشی دیگر اختلاف را می‌توان در ماهیت متغیرهای موثر بر دامنه نسبی نوسانات عرضی بررسی شده در این سه تحقیق دانست؛ به طوریکه عوامل موثر بر دامنه نسبی موج عرضی در تحقیق زیما و اکرمین شامل تعداد موانع در هر ردیف عرضی کانال، قطر موانع، عرض کانال، فاصله‌ی بین موانع در یک ردیف عرضی و عدد بی‌بعد استروهل بود و موانع به صورت زیگزگی قرار داشتند. در تحقیق قمشی علاوه بر این متغیرها، نوع مد هم دخالت داده



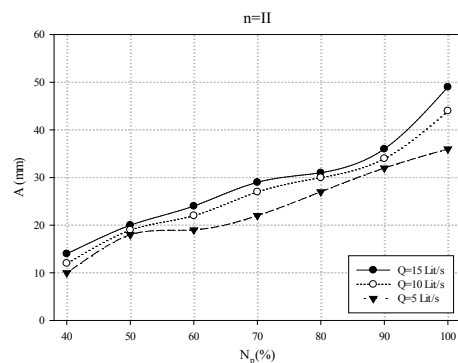
شکل ۸: رابطه‌ی بین دامنه و عمق متوسط جریان در موج مد II

Fig. 8. Relationship between amplitude and flow depth in wave mode II



شکل ۹: مقایسه روند افزایش دامنه نوسان با افزایش درصد عرض پوشیده از موانع کانال در نوسان مد I

Fig. 9. Comparison of the increasing trend of wave amplitude with increasing width percentage covered by obstacles in wave mode I



شکل ۱۰: مقایسه روند افزایش دامنه نوسان با افزایش درصد عرض پوشیده از موانع کانال در نوسان مد II

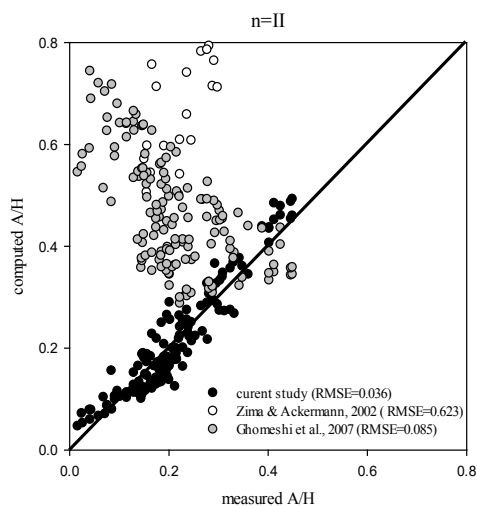
Fig. 10. Comparison of the increasing trend of wave amplitude with increasing width percentage covered by obstacles in wave mode II

مُد موج بود. در تمامی مراحل آزمایش، فاصله‌ی طولی و عرضی بین موانع ثابت و برابر ۵۰ میلی‌متر لحاظ گردید. در روند این آزمایش‌ها در هر مرحله، درصد عرض پوشیده شده از موانع کاهش داده شد و با کاهش عمق متوسط جریان و افزایش سرعت متوسط آن، خصوصیات نوسانات سطحی و عرضی ایجاد شده در جریان در مُدهای I و II مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به اختصار حاصل شد:

- ارزیابی رابطه بین اعداد بی‌بعد رینولدز و استروهل حاکی از کاهش عدد استروهل با افزایش عدد رینولدز در هر یک از دو نوع مد داشت، ضمن آنکه با کاهش درصد عرض پوشیده شده از موانع، عدد استروهل کاهش می‌یافت.

- با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، نوسانات عرضی در عمق‌های بزرگتر تشکیل گردید که دارای دامنه‌ی نوسان بزرگتری نیز بودند. علاوه بر آن مشخص گردید که در یک عمق جریان ثابت با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، دامنه‌ی نوسان نیز افزایش پیدا می‌کند که روند صعود آن در هر یک از مُدهای I و II برای دبی‌های تحت بررسی مقدار ثابتی است.

- در نهایت نیز با استفاده از تحلیل ابعادی و تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده، رابطه‌هایی جهت پیش‌بینی دامنه‌ی نوسانات عرضی جریان در هر یک از مدهای نوسان ارائه گردید. در این روابط علاوه بر اعداد بدون بعد رینولدز، استروهل و اورسل، درصد عرض پوشیده شده از موانع نیز دخالت داده شد.



شکل ۱۲: مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر با رابطه‌های پیشنهادی زیما و اکرم [۲]، قمشی و همکاران [۵] و رابطه ۸ این تحقیق در نوسانات مُد II

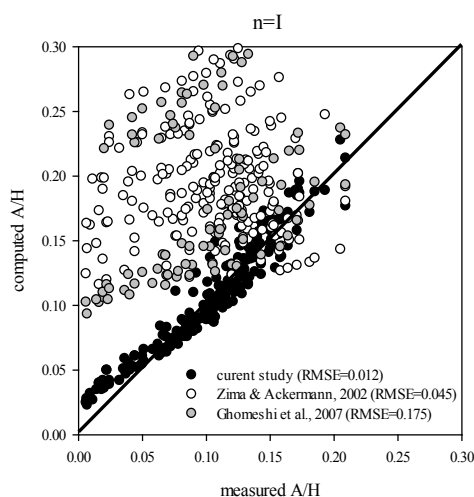
Fig. 12. Comparison of experimental data of this study with suggested equations by Zima and Ackermann [2] and Ghomeshi et al. [5] and also Eq.7 of this study in wave mode II

شده بود و آرایش موانع همچون تحقیق حاضر موازی بود. در هیچ‌یک از دو تحقیق دیگر درصدی از عرض کانال که از موانع پوشیده شده دخالت داده نشده و موانع در کل عرض قرار داشتند. با این وجود دیده می‌شود که خود نتایج دو تحقیق اشاره شده هم با وجود مشابهت متغیرهای دخیل مشابهتی ندارند. در تحقیق حاضر علاوه بر متغیر بی‌بعد استروهل، لزجت سیال و عدد رینولدز مانع که یکی از اصلی‌ترین پارامترهای موثر در تشکیل ورتکس است و همچنین عدد بی‌بعد اورسل هم در روابط دامنه نسبی نوسانات عرضی بررسی شده و دخیل دانسته شده است.

همانند آنچه دینا و پردالا [۷] به آن تاکید می‌کنند راهکار رفع این تناقضات بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر است به طوریکه جزییات تاثیرگذار بر دامنه نسبی موج عرضی به صورت مجزاتر و پررنگتر ارزیابی شوند. همچنین توسعه مدل‌های عددی هم می‌تواند به منظور ارزیابی شرایط طبیعی و آزمایشگاهی متنوع و درک بهتر پدیده و رسیدن به یک رابطه جامع و با دقت قابل قبول جهانی بسیار سودمند واقع شود.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۹ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر و با موانع استوانه‌ای شکل به طول ۲۵ سانتی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر، انجام پذیرفت. موانع استوانه‌ای استفاده شده در این آزمایش مُدلی از پوشش گیاهی صلب موجود در مجاری طبیعی هستند. آزمایش‌ها در چهارده مرحله تعریف شد که تمایز بین آنها در میزان درصدی از عرض کانال که از موانع پوشیده شده و



شکل ۱۱: مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر با رابطه‌های پیشنهادی زیما و اکرم [۲] و قمشی و همکاران [۵] و رابطه ۷ این تحقیق در نوسانات مُد I

Fig. 11. Comparison of experimental data of this study with suggested equations by Zima and Ackermann [2] and Ghomeshi et al. [5] and also Eq.7 of this study in wave mode I

- [7] A. Defina, Irene Pradella, Vortex-induced cross-flow seiching in cylinder arrays, *Advances in Water Resources*, 71 (2014) 140-148.
- [8] D.P. Viero, I. Pradella, A. Defina, Free surface waves induced by vortex shedding in cylinder arrays AU - Viero, Daniele P, *Journal of Hydraulic Research*, 55(1) (2017) 16-26.
- [9] M.H. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S.H. Mosavi Jahromi, S.M. Kashefi Pour, 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).
- [10] B. Shahmoradi, M. Ghimeshi, S. Mostafavi, Experimental Investigation of the Effect of Submerged Cubic Obstacles on The Transverse Wave In A Rectangular Channel, *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1-1) (2017) 27-37 (in Persian).
- [11] S. Mostafavi, M. Ghomeshi, B. Shahmoradi, Study of maximum relative amplitude formation due to vortex shedding of submerged obstacles, *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3) (2016) 209-215 (in Persian).
- [12] J.H. Lienhard, Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders, Washington state university college of engineering, research division, 1966.
- [13] J.S. Fitz-hugh, Flow induced vibration in heat exchangers, *Proceedings of UKAEA/NPL International Symposium on Vibration Problems in Industry*, Windscale, Cumberland, Keswick, (1973) 1-17.
- [14] A. Jafari, M. Ghomeshi, M. Bina, S.M. Kashefi pour, A new equation for obtaining the strouhal number wave due to water passing cylindrical barriers, *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 34 (2011) 45-54 (in Persian).

- دامنه نسبی نوسانات عرضی محاسباتی حاصل از روابط این تحقیق تطابق خوبی با روابط زیما و اکرمین [۲] و قمشی و همکاران [۵] نشان ندادند؛ هرچند اختلافات با نتایج تحقیق قمشی به خصوص در مد I کمتر بود. دلیل این امر را می توان در تفاوت متغیرهای موثر بررسی شده و شرایط آزمایشگاهی در این سه تحقیق دانست ضمن آنکه خود نتایج دو تحقیق اشاره شده هم با وجود مشابهت متغیرهای دخیل مشابهتی ندارند لذا به نظر می رسد به تحقیقات بیشتری برای رسیدن به یک رابطه جامع و با دقت قابل قبول جهانی نیاز است.

۵- تشکر و قدردانی

لازم به ذکر است تحقیق حاضر برگرفته از یک طرح پژوهشی با حمایت مالی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه اراک است که نگارندگان بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از آن معاونت محترم اعلام می نمایند.

مراجع

- [1] J.H. Arakeri, Collapse of the Tacoma Narrows Bridge, Resonance – *Journal of Science Education*, 10(8) (2005) 97-102.
- [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] J.C. Schuster, Canal capacity, wave formation by bridge piers, 1967.
- [4] A. Sarkar, Vortex-excited transverse surface waves in an array of randomly placed circular cylinders, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(7) (2012) 610-618.
- [5] M. Ghomeshi, S.A. Mortazavi-Dorcheh, R. Falconer, Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels, *Journal of Applied Sciences*, 7 (24) (2007) 3927-3934.
- [6] A. Jafari, M. Ghomeshi, M. Bina, S.M. Kashefi pour, 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.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

N. Shahkarami, E. Moghaddasi, Experimental investigation of the characteristics of surface oscillations due to passing flow through rigid vegetation, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 827-834.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12995.5307

