



## بررسی خصوصیات نوسانات سطحی جریان عبوری از موانع با استفاده از اعداد بی بعد روشکو و اورسل

احسان مقدسی<sup>۱</sup>، نازنین شاه‌کرمی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران  
<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳۹۶-۱۲-۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۰۳  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۳-۱۹

### کلمات کلیدی:

تشدید  
دامنه موج  
گردابه  
مانع استوانه‌ای  
موج عرضی

**خلاصه:** در اثر برخورد جریان با موانع موجود در مسیر خود، پدیده گردابه ایجاد می‌شود. در صورت برابری بسامد گردابه‌های ایجاد شده با بسامد نوسانات طبیعی، پدیده تشدید رخ داده و نوسانات سطحی عمود بر جریان با بیشترین دامنه موج به وجود می‌آید. در این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات موج عرضی حاصل از گردابه منتشر شده از موانع، ۱۳۵ مانع استوانه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر در ۵ حالت مختلف در فلوم آزمایشگاهی چیده شدند. در مجموع ۹۰۰ آزمایش انجام شد که متغیرهای آن دبی جریان، عمق متوسط جریان، شیب کانال و فواصل طولی و عرضی موانع بود. در هر آزمایش پس از تشکیل نوسانات عرضی، خصوصیات مربوط به آنها شامل دامنه و بسامد موج ضبط گردید. سپس متغیرهای مؤثر بر خصوصیات امواج عرضی و تأثیرات آن‌ها بر اعداد بی‌بعد دخیل بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود با افزایش دبی جریان، حداکثر دامنه موج در اثر تشدید در عمق متوسط جریان بزرگتری رخ می‌دهد و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین در اکثر حالت‌ها با تغییر فاصله طولی بین موانع، روند تغییرات روشکو نسبت به افزایش اورسل در ابتدا صعودی و پس از رسیدن به یک محدوده‌ی خاص از عدد اورسل حالت معکوس به خود می‌گرفت؛ ضمن آنکه هرچه دبی جریان بیشتر می‌شد، سرعت تغییرات اورسل نسبت به روشکو کاهش می‌یافت. در نهایت با استفاده از آنالیز ابعادی و نرم‌افزار آماری، رابطه‌ای بین اعداد بی‌بعد روشکو با اورسل و فرود جریان برای هر یک از مدهای I و II پیشنهاد شد و صحت روابط با مجذور ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۲ مورد تایید قرار گرفت.

### ۱- مقدمه

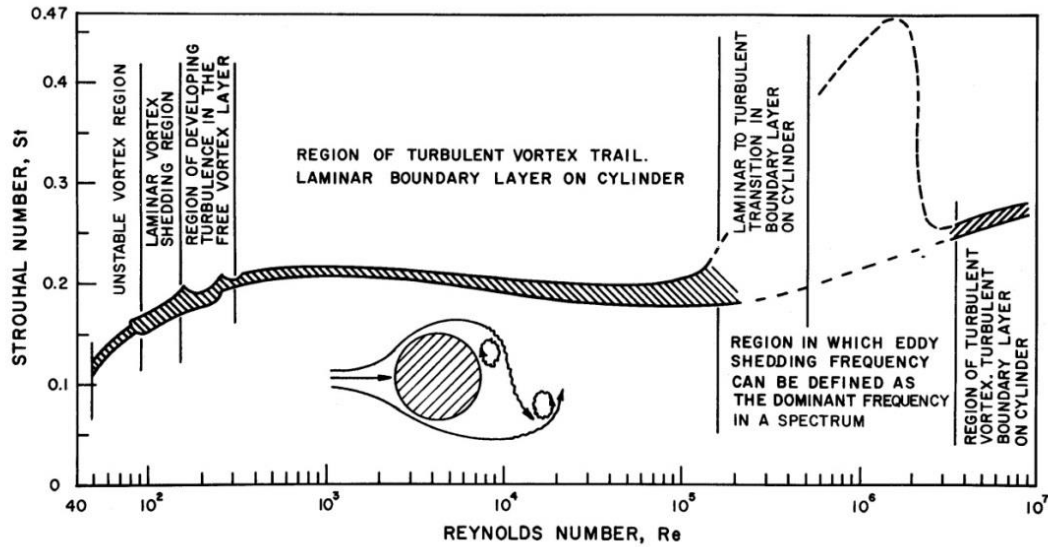
و موج عرضی با حداکثر دامنه ایجاد می‌شود. لینهارد در پژوهشی به بررسی نیروی وارد بر مانع موجود در مسیر جریان و خصوصیات گردابه منتشر شده از آن پرداخت. او محدوده‌هایی از رینولدز مانع برای نوع گردابه منتشر شده تعریف نمود (شکل ۱) و نشان داد در بازه‌ی ۳۰۰ تا  $10^5 \times 2$ ، گردابه متلاطم ایجاد شده که مستعد تشکیل موج و نوسان عرضی می‌باشد. او همچنین ثابت کرد در این بازه، عدد استروهل ( $S_r$ ) مقدار ثابتی حدود ۰/۲ دارد [۱]. پدیده‌ی تشکیل نوسان‌های سطحی ناشی از برخورد جریان سیال با موانع در طبیعت نیز بسیار دیده شده‌است، به‌طور مثال می‌توان به

زمانی که آرایشی از موانع در مسیر یک جریان یکنواخت قرار گیرد، در پایین دست موانع ریزموج‌هایی موسوم به گردابه<sup>۱</sup> تشکیل می‌شود که سبب ایجاد موج سطحی عرضی عمود بر راستای اصلی جریان می‌شوند. هنگامی که بسامد نیروی گردابه ناشی از موانع ( $f_p$ ) با بسامد تعدادی از نوسانات طبیعی آب که تابع عرض کانال و عمق جریان است ( $f$ ) برابر گردد، پدیده‌ی تشدید<sup>۲</sup> رخ داده

- 1 Vortex
- 2 Resonance

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





شکل ۱. رابطه‌ی بین اعداد رینولدز مانع و استروهل و محدوده‌ی انتشار گردابه [۱]  
 Fig. 1. Strouhal- obstacles Reynolds number relationship and the range of vortex shedding

که در آن  $A$  دامنه موج،  $H$  عمق متوسط جریان،  $\frac{A}{H}$  دامنه‌ی نسبی موج،  $N$  تعداد موانع در هر ردیف در عرض کانال،  $D$  قطر موانع،  $B$  عرض کانال،  $T$  فاصله‌ی بین موانع در یک ردیف عرضی و  $S_t$  عدد بی‌بعد استروهل است.

قمشی و همکاران<sup>۴</sup> [۱۱] با انجام تحقیقی آزمایشگاهی روی امواج عرضی در محدوده عدد رینولدز مانع ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰، مشاهده نمودند که حداکثر دامنه موج، ۴۰ درصد عمق متوسط جریان است. در نهایت آن‌ها رابطه‌ی های ۲ و ۳ را برای پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی موج عرضی پیشنهاد کردند.

$$\frac{A}{H} = 1.41N^{0.67} \left(\frac{D}{B}\right) \left(\frac{D}{P}\right)^{0.5} S_t^{-0.5} n^{0.67} \frac{T}{D} \geq 5 \quad (2)$$

$$\frac{A}{H} = 0.078N^{-0.34} \left(\frac{D}{B}\right)^{-0.34} \left(\frac{D}{P}\right)^{0.5} S_t^{-0.5} n^{0.67} \frac{T}{D} < 5 \quad (3)$$

که در آن  $P$  فاصله‌ی بین ردیف‌های موانع در طول کانال و  $n$  مُد موج است.

جعفری و همکاران<sup>۵</sup> [۱۲] در مطالعه آزمایشگاهی خود از سه قطر مختلف مانع استوانه‌ای ۵، ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر استفاده نمودند. عدد رینولدز در آزمایش‌های آن‌ها بین ۱۵۲ تا ۵۹۸۶ قرار داشت. آن‌ها ده مُد مختلف موج را مشاهده نمودند. در آزمایش‌های آن‌ها نیز حداکثر

تخریب پل تاکوماناروز<sup>۱</sup> بر اثر پدیده‌ی تشدید با هم‌پسامد شدن انتشار گردابه حاصل از برخورد جریان هوا با سازه و بسامد طبیعی پل [۲] و همچنین نوسانات سطحی و عرضی آب در کانال دلتامندوتا<sup>۲</sup> [۳] و کانال نیویورک به علت وجود پایه‌های پل در مسیر جریان اشاره نمود [۴].

تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای با موضوعی مشابه با این تحقیق صورت پذیرفته که در اکثر آن‌ها هدف، بررسی نیروی‌های کشش و بالابری وارد به موانع است که به‌عنوان مدلی از پوشش گیاهی صلب در جریان در نظر گرفته شده‌اند [۵-۹]. تعداد محدودتری از این تحقیقات به بررسی خصوصیات موج و نوسان حاصل از برخورد جریان با موانع پرداخته‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده‌است.

زیما و اکرم‌ن<sup>۳</sup> [۱۰] با انجام آزمایش‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که دامنه موج عرضی حداکثر ۳۵ درصد عمق متوسط جریان است و با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و مبانی تئوری، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی موج عرضی وابسته به خصوصیات جریان و مشخصات هندسی موانع به‌صورت رابطه‌ی ۱ ارائه نمودند.

$$\frac{A}{H} = \frac{N}{S_t^2} \frac{D}{B} \left(\frac{D}{T}\right)^2 2.255 \quad (1)$$

- 1 Tacoma Narrows Bridge
- 2 Delta Mendota Canal
- 3 Zima and Ackermann

4 Ghomeshi et al.  
 5 Jafari et al.

دافینا و پرادلا<sup>۳</sup> [۱۶] با استفاده از نتایج سایر محققین و مدل‌های ریاضی، رابطه‌ی ۱۰ را برای به دست آوردن دامنه‌ی نسبی موج ارائه کردند.

$$\frac{A}{H} = \frac{8C_L/\pi C_D}{1 + (4v_k\pi^2 n/C_D DBN_c)} F_r \quad (10)$$

که در آن  $C_L$  ضریب بالابری،  $C_D$  ضریب کشش،  $I_k$  ویسکوزیته گردابی،  $N_c$  تعداد موانع در یک مترمربع از کف کانال و  $F_r$  عدد بی‌بعد فرود است.

ویژ و همکاران<sup>۴</sup> [۱۷] 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<sup>۵</sup> است؛ موج مکزیکی معروف در میان تماشاچی‌های فوتبال نمونه‌ای از موج متاکرونال است. هم‌چنین عدد استروهل 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 حاصل کوچک‌تر خواهد بود. درنهایت آن‌ها رابطه‌ی ۱۱ را برای پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی موج ارائه کردند.

$$\frac{A}{H} = A_T DBN_c F_r^2 \quad (11)$$

که در آن  $A_T$  برای چینش موازی موانع برابر ۱۱ و برای چینش زیگزاگی برابر ۱۲ بود.

پورمحمدی و همکاران [۱۸]، با به‌کارگیری سه نوع مانع مختلف استوان‌های (C) و مثلثی در جهت جریان ( $t_1$ ) و مثلثی در خلاف جهت جریان ( $t_2$ )، در سه فاصله‌ی طول و عرضی ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌متر با دبی جریان ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه به بررسی خصوصیات نوسان عرضی پرداختند و روابط ۱۲ تا ۱۴ را برای تخمین عدد بی‌بعد استروهل ارائه دادند.

$$S_t = \frac{\left(\frac{P}{D}\right)^{0.20}}{N^{0.44} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.84}} \quad (C) \quad (12)$$

دامنه موج برابر ۴۰ درصد عمق متوسط جریان بود. آن‌ها درنهایت رابطه‌ی ۴ را به‌منظور به دست آوردن دامنه نسبی موج معرفی نمودند.

$$\frac{A}{H} = \frac{K}{N^{1.16} S_t^{0.53} \left(\frac{\ddot{e}}{B}\right)^{0.26} \left(\frac{P}{D}\right)^{0.7} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.44}} \quad (4)$$

در رابطه‌ی ۴،  $K$  مقدار ثابتی است که برای آرایش موازی موانع برابر ۴/۲۷ و برای آرایش زیگزاگی برابر ۱/۴۷ است و  $\ddot{e}$  طول موج نوسان بوده که به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود [۱۳].

$$\ddot{e} = \frac{2B}{n} \quad (5)$$

عزیزی و قمشی<sup>۱</sup> [۱۴] با قرار دادن موانع استوان‌های به قطر ۲/۵ سانتی‌متر در مسیر جریانی با شدت ۰/۰۱ مترمکعب بر ثانیه، به بررسی خصوصیات موج عرضی پرداختند و رابطه‌ی ۶ و ۷ را به‌منظور به دست آوردن عدد استروهل ارائه کردند.

$$S_t = \frac{K}{\ln\left(\frac{T}{D}\right) \left(\frac{P}{D} \cdot N\right)^{0.5}} \frac{P}{D} < 5 \quad (6)$$

$$S_t = C_3 \sqrt[3]{\frac{P/D}{(T/D)^2} \cdot N} \frac{P}{D} > 5 \quad (7)$$

$K$  در رابطه‌ی ۶، برای آرایش موازی برابر ۱/۲۱ و برای آرایش زیگزاگی برابر ۱/۴۸ است و  $C$  در رابطه‌ی ۷، برای آرایش موازی برابر ۰/۴۳ و برای آرایش زیگزاگی برابر ۰/۵۲ است.

سرکار<sup>۲</sup> [۱۵] در آزمایش‌های خود مشاهده کرد که حداکثر دامنه موج تقریباً در یک‌پنجم ابتدایی طول محل قرارگیری موانع در کانال رخ می‌دهد و درنهایت رابطه‌ی ۱۰ را به‌منظور پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی موج پیشنهاد نمود.

$$\frac{A}{H} = \frac{KND^3L}{BS_t^2[2h - \pi NDL]} \quad (8)$$

که در آن  $L$  طول مانع استوان‌های و  $K$  عددی ثابت است که توسط ضریب بالابری  $C_L$ ، به‌صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود.

$$K = \frac{C_L}{4} \quad (9)$$

3 Defina and Pradella  
4 Viero et al.  
5 Metachronal wave

1 Azizi and Ghomeshi  
2 Sarkar

که در آن  $\frac{H_s}{H}$  به عنوان نسبت استغراق مانع تعریف شده و  $H_s$  میزان استغراق مانع و یا به بیان دیگر میزان ارتفاع آب روی مانع بود. همچنین آن‌ها موج عرضی مشاهده شده را در  $۳۸/۸۹$  درصد استغراق مانع در حالت چینش زیگزاگی و  $I$  و  $۳۲/۲۶$  درصد در حالت چینش موازی موانع در  $II$  گزارش نمودند.

مصطفوی و همکاران [۲۱] با استفاده از هشت ردیف مانع چوبی با سطح مقطع‌های مثلثی و استوان‌های و در فواصل طولی و عرضی ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متری و دبی جریان ۲۰ لیتر بر ثانیه به بررسی موج عرضی در دو حالت موانع مستغرق و آزاد پرداختند و رابطه‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ را به منظور محاسبه‌ی عدد استروهمال به ترتیب برای موانع مثلثی با برخورد جریان به ضلع آن، برای موانع مثلثی با برخورد جریان به رأس و برای برخورد جریان با موانع استوان‌های ارائه کردند.

$$S_t = 0.111 \left(\frac{T}{D}\right)^{-0.554} \left(\frac{A}{H}\right)^{-0.11} n^{0.115} N^{0.569} \quad (18)$$

$$S_t = 0.172 \left(\frac{T}{D}\right)^{-0.023} \left(\frac{A}{H}\right)^{0.002} n^{0.01} N^{0.054} \quad (19)$$

$$S_t = 0.175 \left(\frac{T}{D}\right)^{-0.055} \left(\frac{A}{H}\right)^{0.002} n^{0.043} N^{0.024} \quad (20)$$

کوچک بودن توان بعضی از پارامترهای فوق نشان از تشخیص ضعیف پارامترهای مؤثر و تخمین ناصحیح روابط پیشنهادی دارد. شاه‌مرادی و همکاران [۲۲] با استفاده از موانع مکعبی شکل با سطح مقطع  $۶/۲۵$  سانتی‌متر مربع، دامنه‌ی موج عرضی تشکیل شده در حالت آزاد را با دامنه‌ی موج در حالت مستغرق مقایسه نمودند و رابطه‌های ۲۱ و ۲۲ را به منظور محاسبه‌ی نسبت دامنه‌ی موج در حالت مستغرق ( $A_{sb}$ ) به حالت آزاد ( $A_n$ ) به ترتیب برای موج با  $I$  و  $II$  ارائه نمودند.

$$\frac{A_{sb}}{A_n} = 0.001 \frac{\left(\frac{P}{H}\right)^{1.629} \left(\frac{h}{H}\right)^{0.543}}{S_t^{1.616}} \quad (21)$$

$$\frac{A_{sb}}{A_n} = 0.029 \frac{\left(\frac{P}{H}\right)^{1.224} \left(\frac{h}{H}\right)^{6.844}}{S_t^{0.437}} \quad (22)$$

$$S_t = \frac{1}{N^{0.18} \left(\frac{P}{D}\right)^{0.79} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.15}} \quad (t_1) \quad (13)$$

$$S_t = \frac{1}{N^{0.10} \left(\frac{P}{D}\right)^{1.2} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.08}} \quad (t_2) \quad (14)$$

پورمحمدی و همکاران [۱۹] در تحقیق دیگری به بررسی تاثیر شکل مانع بر مشخصات نوسان‌های عرضی جریان حاصل از گردابه منتشر شده از آن‌ها پرداختند و رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ را به منظور پیش‌بینی عدد بی‌بعد استروهمال به ترتیب برای موانع لوزی و مربع شکل پیشنهاد کردند.

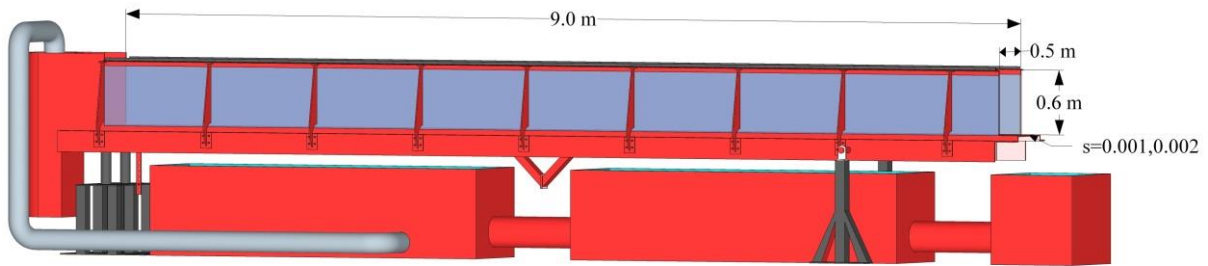
$$S_t = \frac{1}{N^{0.27} \left(\frac{P}{D}\right)^{0.57} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.31}} \quad (15)$$

$$S_t = \frac{1}{N^{0.10} \left(\frac{P}{D}\right)^1 \left(\frac{T}{D}\right)^{0.08}} \quad (16)$$

آن‌ها در نهایت نتیجه گرفتند که نوسان عرضی حاصل از برخورد جریان با موانع استوان‌های قوی‌تر و با دامنه‌ی بیشتر از نوسان‌های عرضی با سایر شکل‌های موانع است. با بررسی روابط ارائه شده از سوی آن‌ها مشخص گردید که این روابط نه تنها با نتایج مشابه سایر محققین هم‌خوانی ندارد، بلکه نمودارهای دربرگیرنده نتایج صحت‌سنجی آزمایشگاهی خود آن تحقیق نیز نتایج رضایت‌بخشی را نشان نداده است.

مصطفوی و همکاران [۲۰] با انجام آزمایشی به بررسی خصوصیات موج عرضی حاصل از برخورد جریان با موانع منشوری با سطح مقطع مثلث پرداختند. شرایط آزمایش به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده بود که موج در حالتی که موانع مستغرق هستند تشکیل و بررسی می‌گردید. آن‌ها در نهایت رابطه‌ی ۱۷ را به منظور پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی موج ارائه نمودند.

$$\frac{A}{H} = \frac{0.023}{\left(\frac{H_s}{H}\right)^{0.496} N^{9.414} n^{0.08} S_t^{7.733}} \quad (17)$$



شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر  
Fig. 2. Laboratory flume of this study

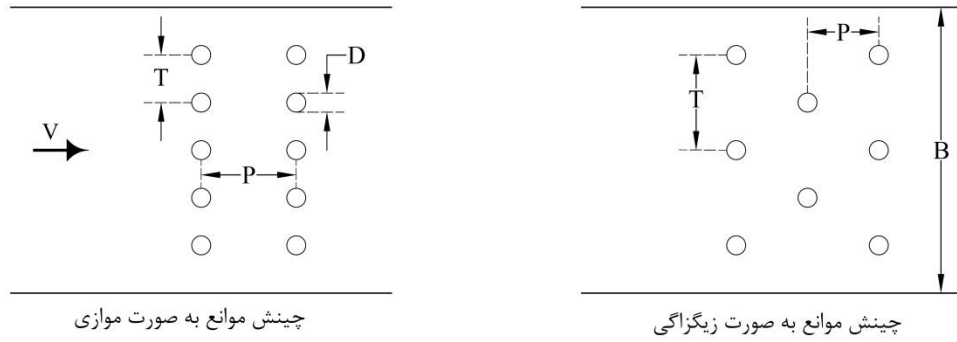
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مراحل آزمایشگاهی

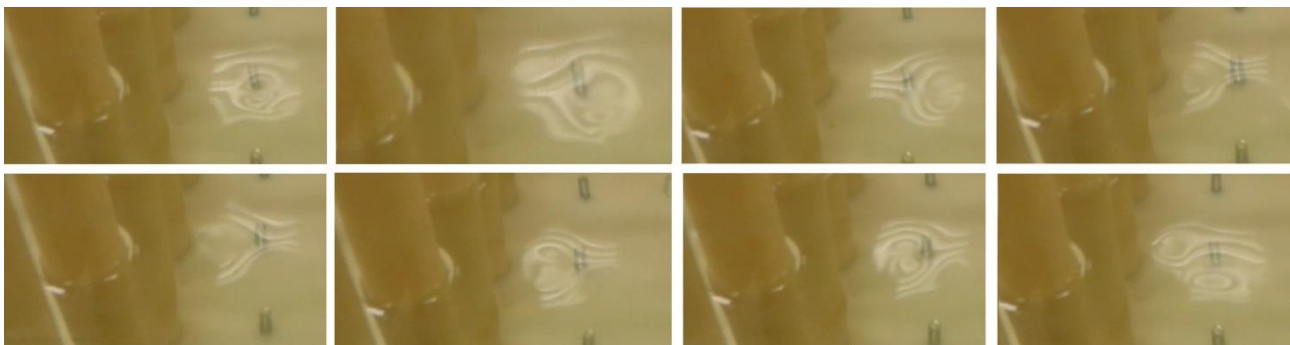
آزمایش‌های این تحقیق در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه اراک با مقطع مستطیل به ابعاد ۵۰ سانتی‌متر عرض، ۶۰ سانتی‌متر ارتفاع و طول مفید ۹ متر (بدون در نظر گرفتن حوضچه‌های ابتدایی و انتهایی) انجام شد (شکل ۲). به منظور ایجاد گردابه و تشکیل نوسانات عرضی در مسیر جریان، ۱۳۵ عدد استوانه به قطر ۲۰ و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر از جنس ارتالن تهیه و به وسیله‌ی پیچ در کف فلوم با آرایش‌های مختلف موازی و زیگزاگی (شکل ۳) چیده شدند. در شکل ۴ روند انتشار گردابه در یکی از مراحل آزمایش‌های این پژوهش نشان داده شده‌است. شیب کانال توسط یک جک هیدرولیکی در دو حالت مختلف ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ تنظیم گردید. دبی جریان در آزمایش‌ها ۴/۳، ۸/۶، ۱۰/۳ و ۱۶ لیتر بر ثانیه بود. موانع در فاصله‌های طولی و عرضی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در ۵ حالت چیده شدند (شکل ۵). پس از ایجاد آرایش مورد نظر از موانع، تنظیم دبی و شیب (ستونهای ۳ تا ۷ جدول ۱)، با بستن دریچه انتهایی فلوم، سطح آب را به اندازه کافی بالا آورده تا موج تشکیل شود. در هر مرحله پس از تشکیل موج، بعد از ثابت شدن و کنترل نداشتن تغییر

در اکثر پژوهش‌های مرتبط با تحقیق حاضر، سعی در یافتن رابطه‌ای به منظور بررسی دامنه‌ی نسبی موج عرضی با توجه به خصوصیات جریان، کانال و موانع بوده‌است.

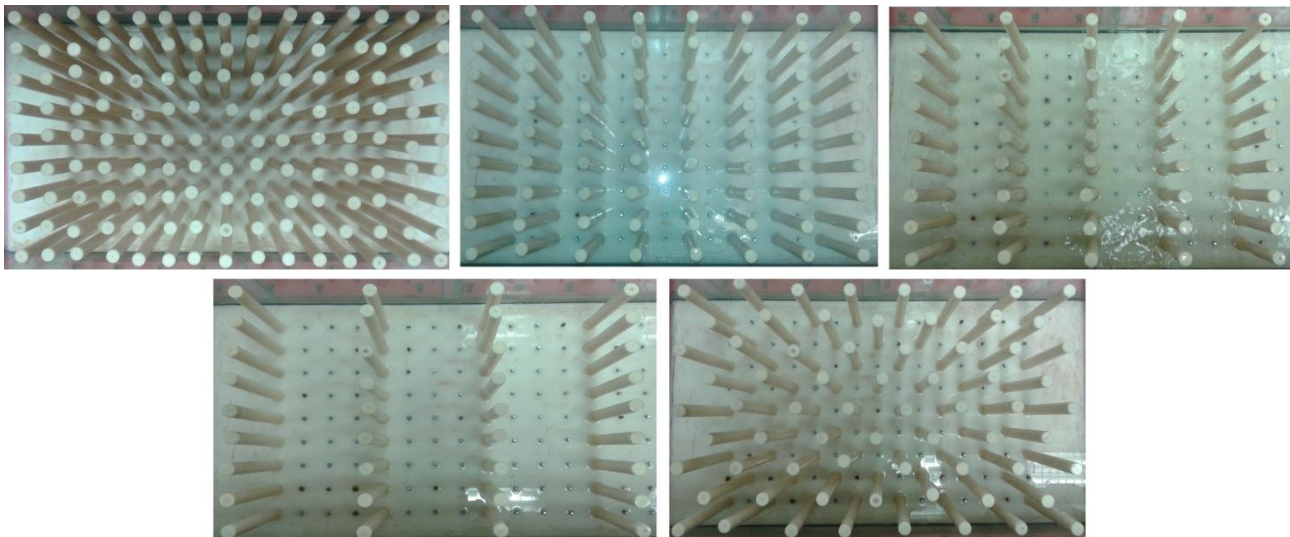
در تحقیق حاضر سعی شده‌است نوسانات عرضی را با قرار دادن موانع استوانه‌ای صلب در مسیر جریان، ایجاد نموده و با تعریف دو عدد بی‌بعد روشکو و اورسل که تاکنون در بررسی این پدیده استفاده نشده‌است، خصوصیات این نوسان را پیش‌بینی نمود. دلیل استفاده از عدد بی‌بعد روشکو در این تحقیق حذف سرعت متوسط جریان در این در میان موانع بود، زیرا محاسبه‌ی سرعت متوسط جریان در این پژوهش همانند اکثر تحقیقات آزمایشگاهی بر روی فلوم، با فرض ثابت بودن دبی، عرض و عمق جریان، به علت ماهیت نوسانی سطح آب، عمل دقیقی نمی‌باشد، لذا با ضرب نمودن دو عدد بی‌بعد رینولدز و استروهل عدد دیگری به نام روشکو تعریف می‌شود که علی‌رغم حذف سرعت در محاسبات، خصوصیت بسامد نوسان را در خود دارد [۲۳]. هم‌چنین توجیه استفاده از عدد بی‌بعد اورسل نیز آن است که این عدد در بردارنده‌ی دامنه‌ی نسبی نوسان (اکثر محققین از آن برای توصیف فرآیند تشدید موج عرضی استفاده نموده‌اند [۲۰، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۲، ۱۱، ۱۰]) و طول موج است.



شکل ۳. چینش موازی و زیگزاگی موازی در فلووم و تعریف قطر مانع (D)، فاصله‌ی طولی بین موازی (P)، فاصله‌ی عرضی بین موازی (T) و عرض فلووم (B)  
 Fig. 3. Parallel and zig-zag placement of obstacles in the flume and definition of the obstacle diameter (D), the longitudinal distance between obstacles (P), transverse distance between obstacles (T) and flume width (B)



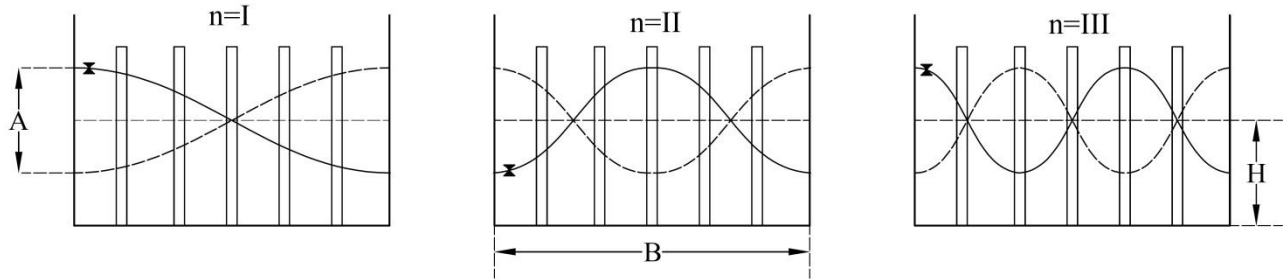
شکل ۴. یک نمونه انتشار گردابه از موازی در فلووم آزمایشگاهی تحقیق حاضر  
 Fig. 4. A sample of vortex shedding from obstacles in the laboratory flume of present study



شکل ۵. حالت‌های مختلف چینش موازی در فلووم  
 Fig. 5. The various obstacle configurations of present study

از سه ارتفاع سنج که در ابتدا، وسط و انتهای مجموعه موازی بر روی دیواره فلووم نصب شده بودند، استفاده شد، ضمن آن‌که برای اطمینان

در میزان دامنه و بسامد موج با استفاده از خط‌کش‌های نصب شده و کرنومتر، اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. برای اندازه‌گیری دامنه موج



شکل ۶. مُدهای مختلف نوسانات عرضی دیده شده در این تحقیق (H: عمق متوسط جریان، A: دامنه‌ی نوسان و B: عرض فلوم)  
 Fig. 6. Various modes of observed transverse oscillation in this research (mean flow depth (H), oscillation amplitude (A) and flume width (B))

و کنترل اندازه گیری از یک ارتفاع سنج متحرک ریلی در میانه فلوم نیز استفاده گردید. هم‌چنین زمان یک نوسان کامل سطح آب (بالا و پایین رفتن آن) به‌عنوان بسامد موج اندازه گیری گردید. بعد از آن عمق متوسط جریان با گام‌های ۵ میلی‌متری با پایین آوردن دریچه‌ی انتهایی کاهش داده‌شد و مجدداً اندازه گیری‌ها صورت گرفت. این عمل تا جایی ادامه پیدا کرد که عمق آب کم و سرعت و تلاطم جریان زیاد شود و نتوان مُد موج را تشخیص داد. در این پژوهش، موج تا مُد III مشاهده شد (شکل ۶) اما به علت اینکه مُد III در تمام حالت‌ها تشکیل نشد، از نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌ها حذف گردید. با توجه به شرایط آزمایشگاهی این پژوهش و بررسی دامنه‌ی موج در سه محل ابتدا، وسط و انتهای مجموعه‌ی موانع در طول کانال، بیشترین دامنه برای موج نوع I در وسط مجموعه موانع و برای موج‌های نوع II و III در انتهای پایین‌دست مجموعه موانع تشکیل می‌گردید. این نوع موج نه‌تنها در عرض کانال نوسان دارد، بلکه در طول کانال و در محدوده‌ی موانع نیز دارای نوساناتی است.

## ۲-۲- اعداد بی‌بعد و آنالیز ابعادی

از پارامترهایی که در خصوصیات موج عرضی مؤثر هستند می‌توان، A دامنه نوسان،  $f_s$  بسامد موج، n مُد موج،  $\lambda$  طول موج، B عرض کانال، f بسامد طبیعی کانال، H عمق متوسط جریان، N تعداد موانع در یک ردیف از عرض کانال، s شیب کانال، V سرعت متوسط جریان، D قطر مانع، h ارتفاع مانع، P فاصله‌ی بین موانع در طول کانال، T فاصله بین موانع در عرض کانال، g شتاب گرانشی زمین و  $\lambda$  ویسکوزیته‌ی سیال را نام بُرد.

از اعداد بدون بعد مرسوم که در تحقیقات مرتبط با بررسی خصوصیات موج عرضی مورد استفاده وسیع قرار گرفته اند می‌توان به اعداد بدون بعد رینولدز ( $R_e$ )، استروهال ( $S_t$ ) و عدد فرود ( $F_r$ ) اشاره کرد که به ترتیب بر اساس روابط ۲۳، ۲۴ و ۲۵ بدست می‌آیند.

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (23)$$

$$S_t = \frac{f_s D}{V} \quad (24)$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (25)$$

در بعضی از مرحله‌های آزمایش که فاصله‌ی عرضی موانع بیش از فاصله‌ی طولی آن‌ها است، مانند حالتی از آزمایش که فاصله‌ی عرضی بین موانع ۵ و فاصله طولی بین آن‌ها ۲۰ سانتی‌متر و شیب طولی کانال ۰/۰۲ بود، ترتیب تغییر مُد موج به‌هم خورده و بعد از تشکیل موج مُد I، نوسان مُد III و سپس مُد II مشاهده می‌گردید. در بعضی از مراحل هم قبل از تغییر مُد موج از I به II، نوسان به‌طور کامل ایستاده و سطح جریان کاملاً آرام و بدون تلاطم بود و با کمی افزایش سرعت جریان با کم نمودن عمق آن سطح آب شروع به نوسان نموده و موج مد II تشکیل می‌شد. در اکثر مرحله‌های آزمایش، تشکیل موج در حالتی که موانع مستغرق بودند (ارتفاع متوسط جریان از ارتفاع

جدول ۱. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌ها (Q: دبی جریان، s: شیب طولی کانال، T: فاصله‌ی عرضی بین موانع، P: فاصله‌ی طولی بین موانع، N: تعداد موانع در هر ردیف، دامنه‌ی موج، H: عمق متوسط جریان، عدد فرود جریان، عدد رینولدز مانع، عدد استروهل، عدد روشکو و عدد اورسل)

**Table 1. Summary of experiments results (Flow discharge (Q), Flume longitudinal slope (s), Transverse distance between obstacles (T), Longitudinal distance between obstacles (P), Number of obstacles in each row (N), Wave amplitude (A\_max), Mean flow depth (H), Froude number (F\_r), obstacle Reynolds number (R\_e), Strouhal number (S\_t), Roshko number (R\_o) and Ursell number (U\_r))**

حالت	تعداد	Q (Lit/s)	s (%)	T (mm)	P (mm)	N	A <sub>max</sub> (mm)	H (mm)	F <sub>r</sub>	R <sub>e</sub>	S <sub>t</sub>	R <sub>o</sub>	U <sub>r</sub>
۱	۵۶	۱۶	۰/۱	۵۰	۵۰	۹	۴۶	۳۴۸ ۱۸۱	-۰/۴۰ ۰/۲۱	-۳۵۳۶ ۱۸۳۹	-۰/۱۸ ۰/۰۵	-۳۵۲ ۱۶۷	-۱/۷۰ ۰/۰۵
۲	۳۸	۱۰/۳	۰/۱	۵۰	۵۰	۹	۴۷	۲۸۵ ۱۰۸	-۰/۴۳ ۰/۱۶	-۳۸۳۳ ۱۴۴۶	-۰/۲۴ ۰/۰۵	-۳۵۶ ۱۹۲	-۱/۶۰ ۰/۴۵
۳	۴۶	۸/۶	۰/۱	۵۰	۵۰	۹	۴۵	۲۷۳ ۱۰۴	-۰/۳۸ ۰/۱۴	-۳۳۲۴ ۱۲۶۰	-۰/۲۸ ۰/۰۶	-۴۰۲ ۱۹۴	-۷/۱۰ ۰/۱۰
۴	۳۳	۴/۳	۰/۱	۵۰	۵۰	۹	۳۵	۵۵-۱۷۳	-۰/۳۶ ۰/۱۱	-۳۱۶۴ ۱۰۰۹	-۰/۳۷ ۰/۰۷	-۴۱۱ ۲۰۸	-۲۵/۵۰ ۰/۱۹
۵	۳۵	۱۶	۰/۲	۵۰	۵۰	۹	۴۴	۳۵۱ ۱۸۹	-۰/۳۸ ۰/۲۱	-۳۳۸۶ ۱۸۲۶	-۰/۱۸ ۰/۰۶	-۳۴۸ ۱۹۶	-۱/۵۶ ۰/۰۲
۶	۳۲	۱۰/۳	۰/۲	۵۰	۵۰	۹	۴۷	۲۹۴ ۱۱۹	-۰/۳۹ ۰/۱۶	-۳۴۷۷ ۱۴۰۱	-۰/۲۵ ۰/۰۵	-۳۵۶ ۱۶۹	-۴/۹۵ ۰/۰۸
۷	۳۵	۸/۶	۰/۲	۵۰	۵۰	۹	۴۳	۲۷۲ ۱۰۰	-۰/۳۹ ۰/۱۴	-۳۴۴۰ ۱۲۶۷	-۰/۲۸ ۰/۰۶	-۳۶۴ ۱۹۶	-۷/۷۲ ۰/۰۵
۸	۳۳	۴/۳	۰/۲	۵۰	۵۰	۹	۳۵	۵۵-۱۶۸	-۰/۳۶ ۰/۱۲	-۳۱۶۴ ۱۰۳۹	-۰/۳۶ ۰/۰۷	-۴۲۲ ۲۱۲	-۲۶/۶۴ ۰/۲۱
۹	۱۸	۱۶	۰/۱	۱۰۰	۵۰	۵	۲۱	۲۹۸ ۲۰۱	-۰/۳۶ ۰/۲۴	-۳۱۸۴ ۲۱۵۱	-۰/۱۶ ۰/۱۱	-۳۴۸ ۳۰۶	-۱/۰۲ ۰/۰۴
۱۰	۲۶	۱۰/۳	۰/۱	۱۰۰	۵۰	۵	۲۱	۲۶۱ ۱۳۴	-۰/۳۵ ۰/۱۸	-۳۰۷۵ ۱۵۷۹	-۰/۲۲ ۰/۱۲	-۳۸۱ ۳۴۴	-۳/۹۴ ۰/۱۱
۱۱	۱۹	۸/۶	۰/۱	۱۰۰	۵۰	۵	۲۳	۱۹۸ ۱۲۱	-۰/۳۲ ۰/۲۰	-۲۸۴۳ ۱۷۳۷	-۰/۲۱ ۰/۱۴	-۴۰۰ ۳۵۶	-۵/۷۷ ۰/۲۶
۱۲	۱۴	۴/۳	۰/۱	۱۰۰	۵۰	۵	۱۳	۶۰-۱۲۰	-۰/۳۳ ۰/۱۶	-۲۹۰۰ ۱۴۵۰	-۰/۲۸ ۰/۱۶	-۴۶۸ ۴۰۰	-۱۵/۴۱ ۱/۱۶
۱۳	۹	۱۶	۰/۲	۱۰۰	۵۰	۵	۲۱	۲۸۶ ۲۲۹	-۰/۳۲ ۰/۲۵	-۲۷۹۵ ۲۲۴۲	-۰/۱۵ ۰/۱۲	-۳۴۷ ۳۴۲	-۱/۰۴ ۰/۱۲
۱۴	۲۹	۱۰/۳	۰/۲	۱۰۰	۵۰	۵	۲۲	۲۶۴ ۱۴۴	-۰/۳۲ ۰/۱۸	-۲۸۷۱ ۱۵۶۴	-۰/۲۲ ۰/۱۵	-۴۲۷ ۳۴۲	-۳/۲۴ ۰/۰۵
۱۵	۱۷	۸/۶	۰/۲	۱۰۰	۵۰	۵	۲۱	۲۰۹ ۱۳۰	-۰/۳۰ ۰/۱۹	-۲۶۴۶ ۱۶۴۶	-۰/۲۱ ۰/۱۵	-۳۹۲ ۳۴۸	-۴/۴۹ ۰/۲۲
۱۶	۱۰	۴/۳	۰/۲	۱۰۰	۵۰	۵	۱۲	۸۰-۱۲۷	-۰/۲۵ ۰/۱۶	-۲۱۸۹ ۱۳۷۵	-۰/۲۹ ۰/۲۱	-۴۶۸ ۳۹۶	-۱۲/۱۴ ۰/۴۹



۱۷	۲۹	۱۶	۰/۱	۵۰	۱۰۰	۹	۴۲	-۳۱۰ ۱۶۰	-۰/۴۵ ۰/۲۳	-۴۰۱۳ ۲۰۶۸	-۰/۱۶ ۰/۰۶	-۳۴۸ ۲۳۸	-۲/۶۰ ۰/۰۳
۱۸	۳۷	۱۰/۳	۰/۱	۵۰	۱۰۰	۹	۳۲	۹۶-۲۷۵	-۰/۴۸ ۰/۱۷	-۴۲۹۲ ۱۵۰۱	-۰/۲۳ ۰/۰۶	-۳۶۰ ۲۰۰	-۵/۷۷ ۰/۰۵
۱۹	۳۰	۸/۶	۰/۱	۵۰	۱۰۰	۹	۳۰	۸۳-۲۶۱	-۰/۴۷ ۰/۱۵	-۴۱۴۵ ۱۳۲۱	-۰/۲۶ ۰/۰۶	-۴۰۰ ۲۰۰	-۷/۱۸ ۰/۰۶
۲۰	۱۷	۴/۳	۰/۱	۵۰	۱۰۰	۹	۲۵	۵۱-۱۵۲	-۰/۳۹ ۰/۱۳	-۳۴۴۶ ۱۱۴۹	-۰/۳۵ ۰/۰۸	-۴۲۴ ۲۰۸	-۲۲/۲۳ ۰/۲۹
۲۱	۱۸	۱۶	۰/۲	۵۰	۱۰۰	۹	۴۰	-۳۱۲ ۱۵۵	-۰/۴۷ ۰/۲۳	-۴۱۲۹ ۲۰۵۵	-۰/۱۶ ۰/۰۶	-۳۴۴ ۲۲۰	-۲/۵۳ ۰/۰۳
۲۲	۲۸	۱۰/۳	۰/۲	۵۰	۱۰۰	۹	۳۵	۹۸-۲۷۲	-۰/۴۷ ۰/۱۷	-۴۲۰۴ ۱۵۱۵	-۰/۲۳ ۰/۰۶	-۳۶۱ ۱۹۶	-۷/۰۶ ۰/۱۰
۲۳	۳۰	۸/۶	۰/۲	۵۰	۱۰۰	۹	۳۰	۸۰-۲۵۷	-۰/۴۹ ۰/۱۵	-۴۳۰۰ ۱۳۳۹	-۰/۲۶ ۰/۰۶	-۳۷۴ ۲۰۰	-۷/۸۶ ۰/۱۲
۲۴	۱۷	۴/۳	۰/۲	۵۰	۱۰۰	۹	۲۸	۴۵-۱۴۴	-۰/۴۱ ۰/۱۴	-۳۶۲۵ ۱۲۱۳	-۰/۳۲ ۰/۰۸	-۴۲۸ ۲۰۸	-۳۵/۹۶ ۲/۳۷
۲۵	۲۰	۱۶	۰/۱	۵۰	۱۵۰	۹	۳۴	-۳۰۶ ۱۷۱	-۰/۴۲ ۰/۲۴	-۳۷۴۳ ۲۰۹۵	-۰/۱۶ ۰/۰۵	-۳۴۴ ۱۸۸	-۱/۵۶ ۰/۰۳
۲۶	۱۵	۱۰/۳	۰/۱	۵۰	۱۵۰	۹	۳۰	-۲۳۹ ۱۱۵	-۰/۴۰ ۰/۱۹	-۳۵۸۳ ۱۷۲۴	-۰/۲۰ ۰/۰۶	-۳۵۱ ۲۰۰	-۰/۴۵ ۰/۰۵
۲۷	۱۶	۸/۶	۰/۱	۵۰	۱۵۰	۹	۳۰	۹۶-۲۲۳	-۰/۴۰ ۰/۱۷	-۳۵۸۳ ۱۵۴۳	-۰/۲۲ ۰/۰۶	-۳۶۲ ۲۰۰	-۳/۷۵ ۰/۱۱
۲۸	۱۶	۴/۳	۰/۱	۵۰	۱۵۰	۹	۱۹	۵۱-۱۴۴	-۰/۳۹ ۰/۱۴	-۳۴۱۲ ۱۲۱۳	-۰/۳۱ ۰/۰۶	-۴۲۴ ۲۱۲	-۱۳/۵۶ ۰/۳۴
۲۹	۲۱	۱۶	۰/۲	۵۰	۱۵۰	۹	۳۴	-۲۹۵ ۱۶۵	-۰/۴۴ ۰/۲۵	-۳۸۷۹ ۲۱۷۳	-۰/۱۶ ۰/۰۵	-۳۴۰ ۲۰۰	-۱/۵۱ ۰/۰۲
۳۰	۱۹	۱۰/۳	۰/۲	۵۰	۱۵۰	۹	۳۲	-۲۴۹ ۱۰۴	-۰/۴۵ ۰/۱۹	-۳۹۶۲ ۱۶۵۸	-۰/۲۱ ۰/۰۵	-۳۴۸ ۱۹۶	-۲/۶۰ ۰/۰۷
۳۱	۱۶	۸/۶	۰/۲	۵۰	۱۵۰	۹	۲۸	۹۴-۱۹۹	-۰/۴۲ ۰/۲۰	-۳۶۷۹ ۱۷۳۳	-۰/۲۰ ۰/۰۵	-۳۶۴ ۲۰۰	-۳/۷۶ ۰/۰۸
۳۲	۱۴	۴/۳	۰/۲	۵۰	۱۵۰	۹	۱۹	۵۳-۱۴۴	-۰/۳۷ ۰/۱۴	-۳۳۱۴ ۱۲۱۳	-۰/۳۲ ۰/۰۶	-۴۲۶ ۲۱۲	-۱۴/۴۶ ۰/۳۴
۳۳	۱۵	۱۶	۰/۱	۵۰	۲۰۰	۹	۲۳	-۳۰۷ ۱۹۷	-۰/۳۷ ۰/۲۴	-۳۲۵۷ ۲۰۸۸	-۰/۱۶ ۰/۰۶	-۳۳۹ ۲۰۰	-۱/۲۴ ۰/۰۲
۳۴	۱۹	۱۰/۳	۰/۱	۵۰	۲۰۰	۹	۲۳	-۲۴۷ ۱۲۵	-۰/۳۷ ۰/۱۹	-۳۲۹۶ ۱۶۷۱	-۰/۲۰ ۰/۰۷	-۳۷۴ ۲۳۸	-۱/۹۵ ۰/۳۳
۳۵	۱۷	۸/۶	۰/۱	۵۰	۲۰۰	۹	۲۳	۹۱-۲۱۰	-۰/۴۳ ۰/۱۹	-۳۸۰۱ ۱۶۴۲	-۰/۲۱ ۰/۰۴	-۳۶۸ ۱۶۰	-۲/۹۶ ۰/۱۱
۳۶	۹	۴/۳	۰/۱	۵۰	۲۰۰	۹	۱۹	۵۵-۱۱۸	-۰/۳۶	-۳۱۹۳	-۰/۲۷	-۴۳۲	-۱۲/۱۹

									۰/۱۷	۱۴۷۵	۰/۰۷	۲۱۲	۳/۴۳
۳۷	۱۵	۱۶	۰/۲	۵۰	۲۰۰	۹	۲۴	-۳۰۰	-۰/۴۰	-۳۳۵۲	-۰/۱۲	-۳۳۵	-۲/۲۱
								۱۸۵	۰/۲۵	۱۹۷۶	۰/۰۵	۱۹۵	۰/۰۵
۳۸	۱۳	۱۰/۳	۰/۲	۵۰	۲۰۰	۹	۲۳	-۲۱۰	-۰/۴۰	-۳۴۲۶	-۰/۱۸	-۳۷۶	-۳/۵۰
								۱۰۱	۰/۲۱	۱۵۲۶	۰/۰۵	۲۳۴	۰/۰۷
۳۹	۱۱	۸/۶	۰/۲	۵۰	۲۰۰	۹	۲۲	۸۵-۱۹۸	-۰/۴۵	-۳۹۲۵	-۰/۱۹	-۳۷۰	-۳/۲۲
									۰/۲۱	۱۳۲۵	۰/۰۴	۱۶۰	۰/۰۵
۴۰	۸	۴/۳	۰/۲	۵۰	۲۰۰	۹	۱۸	۵۳-۱۰۰	-۰/۳۵	-۳۰۲۶	-۰/۳۰	-۴۳۵	-۱۴/۱۳
									۰/۱۷	۱۴۵۰	۰/۰۷	۲۱۲	۳/۴۲
جمع	۹۰۰	-	-	-	-	-	۴۷	۴۵-۳۵۱	-۰/۴۵	-۴۳۰۰	-۰/۳۷	-۴۶۸	۰/۰۲-۳۶
									۰/۱۱	۱۰۰۹	۰/۰۴	۱۶۰	

متغیرهای اندازه گیری شده ( $H$  و  $A_{max}$ ) و همچنین دامنه تغییرات محاسبه شده اعداد بدون بعد مؤثر بر موج عرضی در هر مرحله در جدول ۱ ارائه گردیده است. بیشترین دامنه‌ی موج مشاهده شده در این پژوهش ۴۷ میلی متر بود که ۲۴ درصد عمق متوسط جریان در همان مرحله از آزمایش است. در تمام آزمایشات انجام شده، جریان زیربحرانی و بر اساس تعریف لینهارد [۱]، گردابه از نوع تلاطم با محدوده عدد رینولدز مانع بین ۱۰۰۹ تا ۴۳۰۰ بوده است.

تغییرات دامنه‌ی موج عرضی در مقابل عمق متوسط جریان برای دبی های متفاوت در شکل ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی شکل ۷ می توان به این نتیجه رسید که با کاهش عمق جریان، موج عرضی تشکیل می گردد و با کاهش بیشتر آن به وسیله باز نمودن دریچه، به یک ناحیه با حداکثر دامنه‌ی خود می رسد. بعد از آن، به تدریج دامنه‌ی موج، کم شده تا سطح جریان ثابت و بدون نوسان گردد. هم چنین با توجه به این شکل ها واضح است که هرچه دبی جریان بیشتر باشد، حداکثر دامنه‌ی موج در عمق متوسط جریان بیشتری رخ می دهد که مقدار این حداکثر نیز با افزایش دبی بزرگ تر خواهد بود.

به منظور بررسی متغیرهای دخیل بر عدد روشکو و اورسل، با ثابت نگه داشتن تمام متغیرهای دخیل به جز یکی از آنها، تأثیر تغییرات آن متغیر روی روند تغییرات اعداد بی بعد روشکو و اورسل در نوسان های عرضی مُد I و II بررسی گردید. نمونه هایی از نتایج حاصل از این بررسی در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ آمده است.

با بررسی شکل ۸-الف و ب می توان به این نتیجه رسید که هرچه دبی جریان کمتر شود، سرعت تغییرات اورسل نسبت به

در تحقیق حاضر از اعداد بی بعد روشکو ( $R_o$ ) و اورسل ( $U_r$ ) که در توصیف سیالات امواج کاربرد بسیاری دارند و به صورت رابطه های ۲۶ و ۲۷ تعریف می شوند، نیز استفاده شد.

$$R_o = \frac{f_s D^2}{i} = \frac{f_s D}{V} \cdot \frac{VD}{i} = S_i R_e \quad (26)$$

$$U_r = \frac{A\lambda^2}{H^3} = \frac{A}{H} \left(\frac{\lambda}{H}\right)^2 \quad (27)$$

در این پژوهش به منظور دستیابی به رابطه ای که بیانگر خصوصیات موج عرضی عبوری از موانع باشد، متغیرهای حاکم بر پدیده‌ی موج عرضی به صورت رابطه‌ی ۲۸ ارائه گردید.

$$\Phi = (A, f_s, n, \lambda, B, f, H, N, s, V, D, h, P, T, g, v) \quad (28)$$

با بی بعد نمودن رابطه‌ی ۲۸ به روش پی باکینگهام<sup>۱</sup>، می توان آن را به صورت رابطه‌ی ۲۹ بازنویسی کرد.

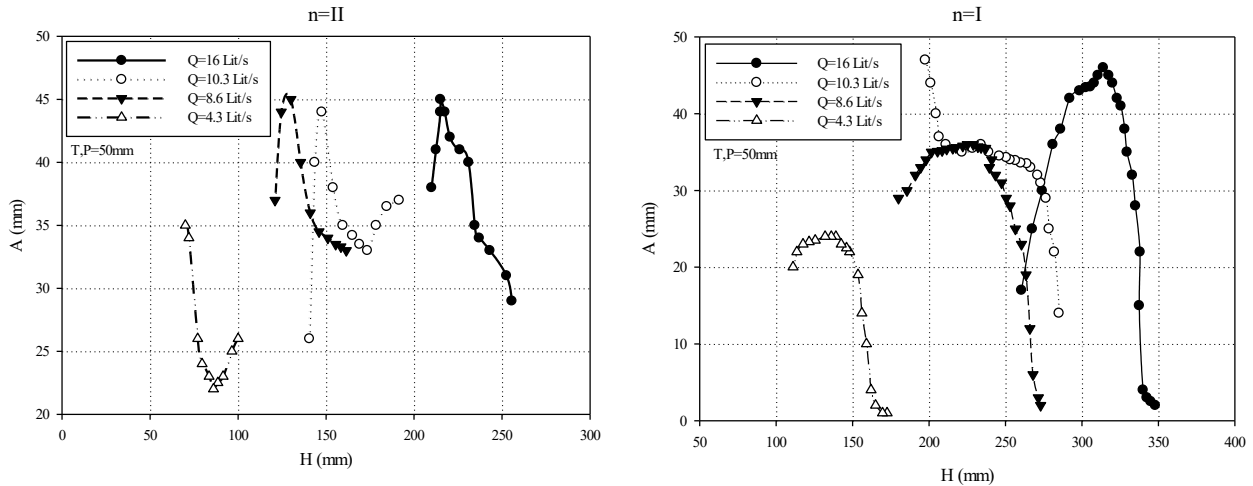
$$\Phi = \left( \frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{f_s D^2}{v}, \frac{A\lambda^2}{H^3}, \frac{f_s}{f}, \frac{D}{h}, \frac{D}{B}, \frac{D}{P}, \frac{D}{T}, N, s, n \right) \quad (29)$$

که در آن  $\frac{f_s D^2}{i}$  عدد بی بعد روشکو ( $R_o$ ) و  $\frac{A\lambda^2}{H^3}$  عدد بی بعد اورسل ( $U_r$ ) است.

### ۳- نتایج و بحث

آزمایش های این تحقیق در ۹۰۰ مرحله (ترکیب  $Q, s, P, T$  و  $N$  متفاوت) صورت پذیرفت که نتایج اولیه شامل مقدار و محدوده

1 Buckingham's -  $\bar{\delta}$



شکل ۷. تغییرات دامنه‌ی موج عرضی در مقابل عمق متوسط جریان برای دیبیه‌های متفاوت (الف: مد I، ب: مد II)  
 Fig. 7. Variation of the transverse wave amplitude versus the mean flow depth (A: Mod I, B: Mod II)

در شکل ۱۰-الف و ب سعی شده‌است روند تغییرات عدد روشکو و اورسل با تغییر شیب طولی کانال از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۲ بررسی شود. در هر دو مُد نوسان مشاهده می‌گردد که تغییر شیب طولی کانال تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی روند تغییرات دو عدد بی‌بعد نسبت به یکدیگر ندارد. البته این دو نمودار تأییدکننده این موضوع هستند که در نوسان مُد I افزایش سرعت و کاهش عمق جریان، روند صعودی بسامد موج و در نوسان مُد II روند نزولی آن را به دنبال خواهد داشت.

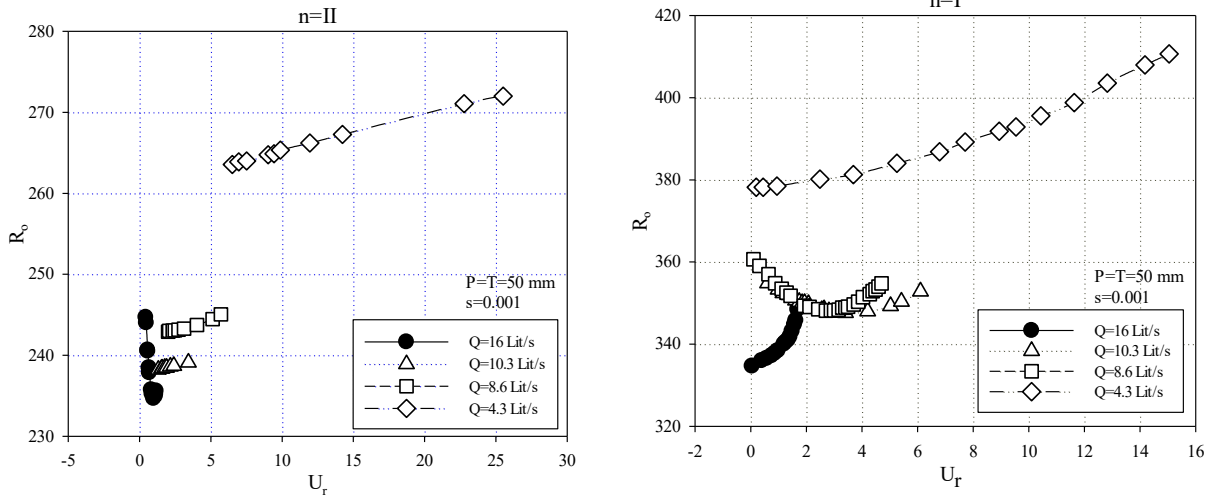
در ادامه تحقیق، با استفاده از آنالیز ابعادی و نرم‌افزار آماری، رابطه‌ای بین اعداد بی‌بعد روشکو با اورسل و فرود جریان برای هر یک از مدهای I و II مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه طبق مطالب گفته‌شده، شرط لازم برای وقوع پدیده‌ی تشدید و موج عرضی، برابر شدن بسامد انتشار گردابه از موانع با بسامد طبیعی کانال است [۱۰]، بنابراین مقدار نسبت  $\frac{f_s}{f}$  در رابطه‌ی ۲۹ برابر یک در نظر گرفته شد و از رابطه حذف گردید.

با کمک نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS ضرایب همبستگی پارامترهای بی‌بعد موجود در رابطه‌ی ۲۹ به دست آمد (جدول ۲). در ادامه بر اساس نتایج حاصل از جدول ۲ و با لحاظ کم اثر بودن بعضی پارامترها و حذف آن‌ها از رابطه‌ی ۲۹ (ضریب همبستگی کمتر از ۰/۲۹) و با کمک نرم‌افزار SPSS، رابطه‌های ۳۰ و ۳۱ جهت پیش‌بینی و تخمین عدد روشکو در دو مُد I و II پیشنهاد گردید.

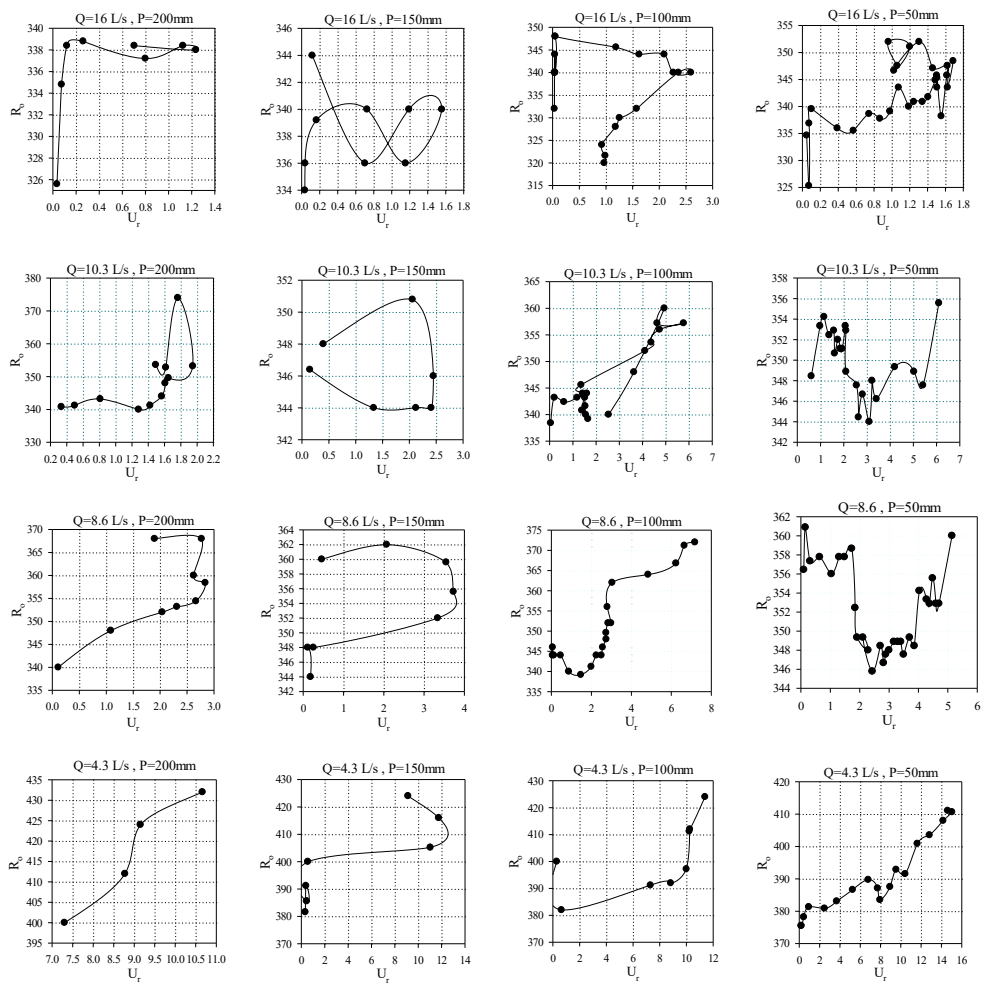
$$R_o = 333.63 + 4.60 U_r^{1.20} F_r^{0.03} \quad n = I \quad (30)$$

روشکو افزایش می‌یابد، با توجه به مشاهده‌های آزمایشگاهی علت این امر آن است که هرچه دبی جریان کاهش پیدا کند، نوسان‌های عرضی در عمق‌های کمتری از جریان تشکیل می‌شوند (شکل ۷) که این امر باعث رشد تصاعدی عدد اورسل نسبت به عدد روشکو می‌شود. هم‌چنین هرچه دبی کمتر شود تغییرات بسامد موج در هر مُد در بازه‌ی کوچک‌تری محدود می‌شود و به دنبال آن تغییرات عدد روشکو نیز نسبت به اورسل کندتر خواهد شد.

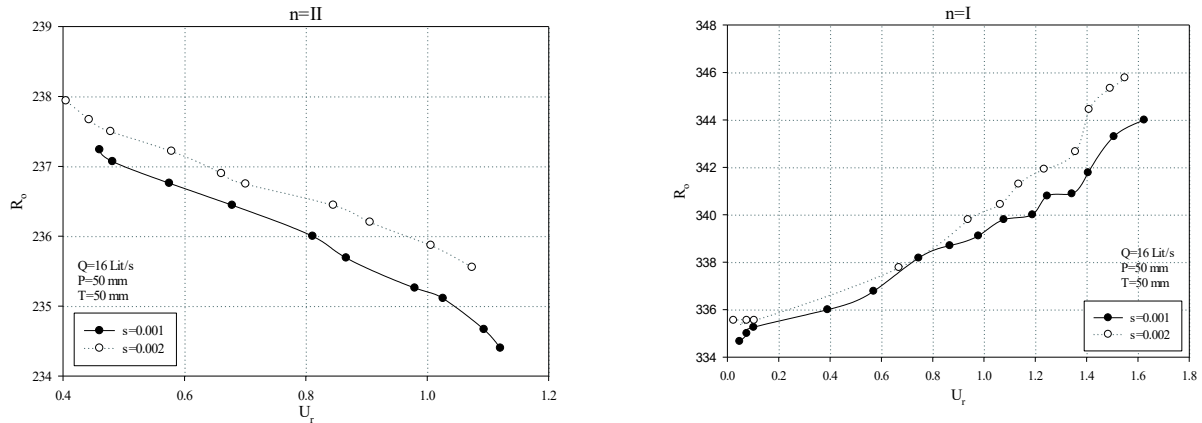
با مشاهده‌ی اولیه‌ی مجموعه‌ی شکل ۹ می‌توان به این نتیجه رسید که تغییر فاصله‌ی طولی بین موانع تأثیر قابل تفسیری روی روند تغییرات عدد بی‌بعد روشکو نسبت به عدد اورسل ندارد ولی با نگاه دقیق‌تر می‌توان دریافت که در اکثر حالت‌های آزمایش روند تغییرات روشکو نسبت به اورسل در ابتدا صعودی بوده و پس از رسیدن به یک محدوده‌ی خاص از عدد اورسل حالت برگشتی به خود می‌گیرد که می‌توان علت آن را روند تغییرات سینوسی دامنه‌ی موج در هر مُد دانست که در ابتدا موج با یک دامنه‌ی کوچک تشکیل می‌شود و رفته رفته به یک مقدار حداکثر می‌رسد و سپس کاهش پیدا می‌کند، تا جایی که تغییر مُد دهد. البته این موضوع در مورد تمام حالت‌های آزمایش جامعیت نداشته و همانطور که در شکل ۹ مشخص است در بعضی حالات دامنه‌ی موج پیوسته افزایش می‌یابد تا در سرعتی خاص تغییر مُد اتفاق بیافتد. هم‌چنین در شکل ۹ مشهود است که هرچه دبی جریان کمتر شده بازه‌ی تغییرات اورسل بزرگ‌تر شده‌است.



شکل ۸. تغییرات عدد روشکو نسبت به اورسل در دیبهای مختلف جریان (الف موج مد I ب) موج مد II)  
 Fig. 8. Variation of the Roshko number versus Ursell number in different flow discharges (A: Mod I, B: Mod II)



شکل ۹. تغییرات عدد روشکو نسبت به اورسل با تغییر فاصله طولی بین موانع در موج مد I، شیب طولی ۰/۰۰۱ و فاصله عرضی ۵۰ mm  
 Fig. 9. Variation of the Roshko number versus Ursell number by changing longitudinal distance between obstacles in mode I, longitudinal slope 0.001 and transverse distance 50mm



شکل ۱۰. روند تغییرات عدد روشکو نسبت به اورسل در شیبهای طولی متفاوت فلوم. (الف موج مُد I، ب) موج مُد II  
 Fig. 10. Variation of the Roshko number versus Ursell number in different longitudinal slopes, (a) Mod I (b) Mod II

جدول ۲. ضرایب همبستگی پارامترهای رابطه‌ی ۲۹  
 Table 2. Correlation coefficients parameters of relation 29

پارامترها	$R_o$	$U_r$	$F_r$	$N$	$s$	$n$	$\frac{D}{B}$	$\frac{D}{T}$	$\frac{D}{P}$
ضریب همبستگی پیرسون با $R_o$	۱	۰/۳۱۰	-۰/۷۴۹	-۰/۱۶۲	۰/۰۱۱	۰/۰۱۸	-۰/۰۰۷	-۰/۱۷۹	۰/۱۳۶

شد سپس با ضرب در عدد رینولدز موانع عدد روشکو محاسباتی آن‌ها به دست آمد. لازم به ذکر است در محاسبات تمام روابط، از داده‌های اولیه تحقیق حاضر استفاده شده است و لذا در تمام این مقایسه‌ها دو مد I و II مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که از خطای جذر میانگین مربعات<sup>۱</sup> محاسبه شده بین عدد روشکو به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و روابط پیشنهادی فوق‌الذکر استنباط می‌شود، نتایج حاصل از پژوهش قمشی و همکاران [۱۱] بیشتر از سایر محققین به نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر نزدیک می‌باشد.

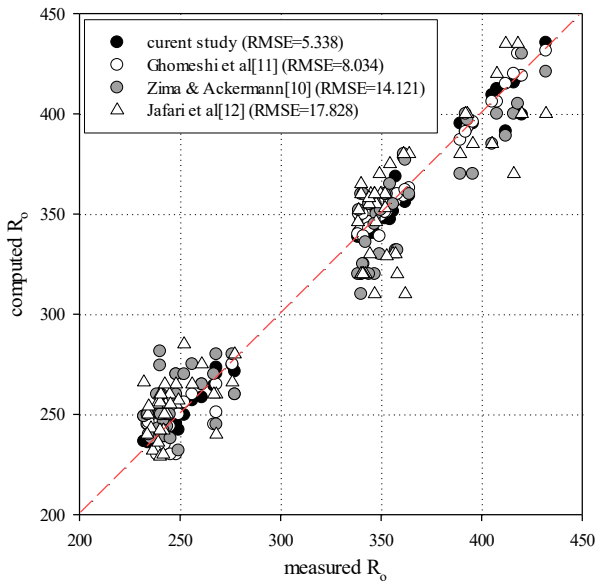
#### ۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی با انجام پژوهش حاضر، نتایج زیر به دست آمد:  
 - با کاهش عمق متوسط جریان، دامنه‌ی موج عرضی حداکثر می‌شود، سپس به تدریج دامنه‌ی موج کم شده تا مُد بعدی نوسان ایجاد شود. این روند تا حدی ادامه می‌یابد که سرعت و اغتشاش در

$$R_o = 235.70 + 3.18 U_r^{1.15} F_r^{0.32} \quad n = II \quad (31)$$

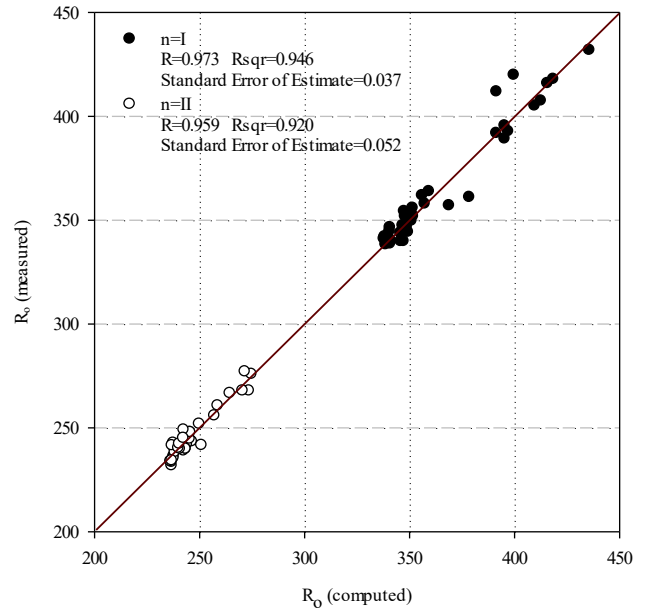
برای به دست آوردن رابطه‌های ۳۰ و ۳۱ از هفتاد درصد داده‌های آزمایشگاهی و از سی درصد مابقی به منظور صحت‌سنجی مدل استفاده شد. مجذور ضریب همبستگی مرحله صحت‌سنجی برای مد‌های I و II به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۹۲ حاصل گردید (شکل ۱۱) هم‌چنین باید اشاره نمود تنها داده‌های مربوط به نوسان با حداکثر دامنه در هر مرحله از آزمایش در به دست آوردن رابطه‌های ۳۰ و ۳۱ شرکت داده شده‌اند.

در ادامه اعداد روشکو حاصل از داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تحقیق حاضر (بخش صحت‌سنجی)، با رابطه‌های ۳۰ و ۳۱ و هم‌چنین روابط پیشنهادی قمشی و همکاران [۱۱]، زیما و اکرمی [۱۰] و جعفری و همکاران [۱۲] مقایسه شدند (شکل ۱۲). با توجه به اینکه در روابط ارائه شده توسط سایر محققین دامنه نسبی نوسان بر حسب عدد استروهمال و سایر پارامترهای وابسته می‌باشد، به منظور مقایسه با داده‌های مشاهداتی و رابطه‌های ارائه شده در این تحقیق ابتدا از روابط آن‌ها عدد استروهمال استخراج



شکل ۱۲. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر با روابط پیشنهادی تحقیق حاضر، قمشی و همکاران [۱۱]، زیما و اکرم [۱۰] و جعفری و همکاران [۱۲]

Fig. 12. Comparison of the experimental data of the present study with the proposed relations of the present research, Ghomeshi et al., Zima and Ackermann and Jafari et al.



شکل ۱۱. نتایج مرحله صحت‌سنجی رابطه‌های ۳۰ و ۳۱  
Fig. 11. The results of verification process of relations 30 and 31

هر یک از مدهای I و II گردید که صحت آن‌ها با مجذور ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۹۲ مورد تأیید قرار گرفت.

- مقایسه خطای جذر میانگین مربعات بین عدد روشکو به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق با روابط پیشنهادی سایر محققین، حاکی از آن است که نتایج حاصل از پژوهش قمشی و همکاران [۱۱] بیشتر از سایر محققین به نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر نزدیک می‌باشد.

- کاربرد این تحقیق در ایجاد موج مصنوعی به منظور استحصال انرژی از موج و یا هوادهی در حوضچه‌های تصفیه و یا کاهش شدت انرژی مخرب موج عرضی حاصل از عبور جریان از میان پایه‌های پل موجود در مجراها می‌باشد.

### مراجع

- [1] J. H. Lienhard, Synopsis of lift, drag and vortex frequency data for rigid circular cylinder, Washington State University, (1966).
- [2] J. H. Arakeri, Collapse of the tacoma narrows bridge, Resonance Journal of Science Education, 10(8)

جریان زیاد شده، به طوری که مُد نوسان قابل تشخیص نباشد.

- هرچه دبی جریان بیشتر باشد، حداکثر دامنه‌ی موج در عمق متوسط جریان بیشتری رخ می‌دهد که مقدار این حداکثر نیز با افزایش دبی بزرگ‌تر خواهد بود.

- هرچه دبی جریان کمتر شود، سرعت تغییرات اورسل نسبت به روشکو افزایش می‌یابد.

- تغییر فاصله‌ی طولی بین موانع، تأثیر قابل تفسیری روی روند تغییرات عدد بی‌بعد روشکو نسبت به عدد اورسل نوسانات ندارد. در اکثر حالت‌های آزمایش روند تغییرات روشکو نسبت به اورسل در ابتدا صعودی بوده و پس از رسیدن به یک محدوده‌ی خاص از عدد اورسل حالت برگشتی به خود می‌گیرد. در بعضی حالات، دامنه‌ی موج پیوسته افزایش می‌یابد تا در سرعتی خاص تغییر مُد اتفاق بیفتد.

- تغییر شیب طولی کانال تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی روند تغییرات دو عدد بی‌بعد روشکو و اورسل نسبت به یکدیگر ندارد.

- بررسی پارامترهای موثر بر خصوصیات نوسانات عرضی و استفاده از آنالیز ابعادی و نرم‌افزار آماری SPSS، منجر به استخراج رابطه‌های بین اعداد بی‌بعد روشکو با اورسل و فرود جریان برای

- [13] R. G. Dean, R.A. Dalrymple, *Water wave mechanics for engineers and scientists*, World Scientific, Cornell University, USA, 1984.
- [14] R. Azizi, M. Ghomeshi, Relationship between the frequency of transverse waves and characteristics of the flow and obstacles in open channel, *Journal of Iran-Water Resource Research*, 6(2) (2010) (In Persian).
- [15] A. Sarkar, Vortex-Excited Transverse Surface Waves in an Array of Randomly Placed Circular Cylinders, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(7) (2012) 610-618.
- [16] A. Defina, I. Pradella, Vortex-induced cross-flow seiching in cylinder arrays, *Journal of Advances in Water Resources*, 71 (2014) 140-148.
- [17] 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.
- [18] M. H. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S.H. Musavi, Impact of Prismatic-Shaped Obstacle on the Characteristics of Transverse Waves, *Journal of Water and Soil Science*, 25(2) (2015) 117-128 (In Persian).
- [19] 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, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering Scientific*, 39(1) (2016) 11-20 (In Persian).
- [20] S. Mostafavi, M. Ghomeshi, B. Shahmoradi, Study of Maximum Relative Amplitude Formation Due To Vortex Shedding Of Submerged Obstacles, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering Scientific*, 39(3) (2016) 209-215 (In Persian).
- [21] 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).
- [22] B. Shahmoradi, M. Ghomeshi, S. Mostafavi, (2005) 97-102.
- [3] J. C. Schuster, Canal capacity, wave formation by bridge piers, Denver, Colorado, 1967.
- [4] A. M. Howes, Canal wave oscillation phenomena due to column vortex shedding, Utah State University, Logan, Utah, 2011.
- [5] 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.
- [6] X. Liu, Y. Zeng, Drag coefficient for rigid vegetation in subcritical open channel, in: 12th International conference on hydroinformatics, ELSEVIER, (2016) 1124-1131.
- [7] V. Dupuis, S. Proust, C. Berni, A. Paquier, Combined effects of bed friction and emergent cylinder drag in open channel flow, *Environ Fluid Mech*, 16(6) (2016) 1173-1193.
- [8] K. Zhao, N.-S. Cheng, X. Wang, S.K. Wang, Measurements of fluctuation in drag acting on rigid cylinder array in open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140 (2014) 48-55.
- [9] A. C. d. Lima, N. Izumi, Linear stability analysis of open-channel shear flow generated by vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3) (2014) 231-240.
- [10] L. Zima, N. Ackermann, Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6) (2002) 596-603.
- [11] M. Ghomeshi, S. A. Mortazavi-Dorcheh, R. Falconer, Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channel, *Journal of Applied Science*, 7 (24) (2007) 3927-3934.
- [12] 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 & Environment*, 8(2) (2010) 949-955.

Persian).  
[23] D. Ormières, M. Provansal, Transition to turbulence in the wake of a sphere, The American Physical Society, 83 (1999) 80-83. Society, 83 (1999) 80-83.

Experimental Investigation of the Effect of Submerged Cubic Obstacles on The Transverse Wave In A Rectangular Channel, Journal of Irrigation Sciences and Engineering Scientific, 40(1-1) (2017) 27-37 (In

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*E. Moghaddasi, N. Shahkarami, Investigating the characteristics of surface oscillations of flow through obstacles using Roshko and Ursell dimensionless numbers, Amirkabir J. Civil Eng., 51(5) (2019) 963-978.*

DOI: [10.22060/ceej.2018.14234.5598](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14234.5598)

