

## بررسی بیشترین دامنه‌ی نسبی موج ایجاد شده از برخورد جریان به موانع مستغرق

سحر مصطفوی<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup> و بهار شاهرادی<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

<sup>۲</sup> - استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۲۵

### چکیده

عبور آب از بین موانع موجود در مسیر جریان مجاری روباز، سبب شکل‌گیری لایه‌ی مرزی در بالادست موانع و جداسازی خطوط جریان در پایین‌دست موانع و ایجاد جریان‌های گردابه ای می‌شود. از هم‌پوشانی گرداب‌های ایجاد شده از هر مانع، امواج سطحی با راستای انتشار عمود بر جریان آب تشکیل می‌شود. زمانی که فرکانس گرداب ناشی از موانع با فرکانس امواج یکسان شود، امواج با حداکثر دامنه شکل گرفته و پدیده‌ی تشدید رخ می‌دهد. هدف از این پژوهش، بررسی بیشترین دامنه نسبی موج عرضی ایجاد شده در زمان تشدید در حالتی که موانع از صفر درصد تا بیشترین درصدی که موج از بین نرود مستغرق شده‌اند، می‌باشد. در این تحقیق، ۷۱ آزمایش در آرایش‌های مختلف موانع منشوری با مقطع مثلث در دو مد یک و دو جریان در حالت برخورد جریان به رأس و ضلع موانع در چینش‌های موازی و زیگزاگی با فواصل ۱۲۰ میلی‌متری موانع از هم صورت گرفت. در آزمایش‌ها، بیشترین دامنه نسبت به عمق جریان ۰/۲+ برای مد یک و ۰/۱۴+ برای مد دو می‌باشد. با استفاده از تحلیل ابعادی و نرم‌افزارهای آماری، رابطه‌ای برای برآورد دامنه نسبت به عمق جریان در زمان تشدید پیشنهاد شد. در پایان، داده‌های به‌دست‌آمده از رابطه‌ی پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

کلیدواژه‌ها: حداکثر دامنه‌ی نسبی، موانع مستغرق، گردابه، امواج عرضی.

### Study of Maximum Relative Amplitude Formation Due To Vortex Shedding Of Submerged Obstacles

S. Mostafavi<sup>1\*</sup>, M. Ghomeshi<sup>2</sup> and B. Shahmoradi<sup>3</sup>

1\*- M.Sc. Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3- M.Sc. Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 16 September 2015

Accepted: 31 October 2015

### Abstract

In open channels, when water flows through obstacles, boundary layer on upstream and the separation of streamlines on downstream of the obstacles and therefore vortex shedding will occur. The overlap of vortex wave reflecting from the walls of channels may produce surface waves which are perpendicular to the direction of the flow. When the vortex frequency of obstacles and flow natural frequency become equal, resonance will occur. The purpose of current study was to determine the relative amplitude of transverse waves in submerged flow while resonance occurs. The submerge processing started from 0% into max percent while the waves are visible. This research included 71 tests in different prism obstacles with two style of water strike toward edge and face of the obstacles and in two different inline and staggered arrangements in two modes of transverse waves. The obstacle distances were 120 millimeters from each other. The maximum relative amplitude of the flow depth was 0.2 for mode one and 0.14 for the second modes of transverse wave. By using software and statistical analysis, a formula was suggested for determining the maximum relative amplitude of the flow depth. Finally, the data determined by suggested formula were compared with the laboratory data.

**Keywords:** Maximum relative amplitude, Submerged obstacles, Vortex, Transverse waves.

امواج نوع یک و در برخی آزمایش‌ها نوع دو را مشاهده کردند و رابطه‌ای برای محاسبه‌ی حداکثر دامنه‌ی نسبی<sup>۱۱</sup> (دامنه نسبت به عمق جریان) امواج عرضی تولید شده در حالت تشدید ارائه کردند:

$$\frac{A}{H} = \frac{N}{St^2} \frac{D}{P} \left(\frac{D}{b}\right)^2 K \quad (1)$$

که در این رابطه، A: دامنه امواج، N: تعداد استوانه‌ها در یک ردیف، P: فاصله بین ردیف‌های موانع، D: قطر موانع، b: عرض فلوم، St: عدد استروهل، H: ارتفاع آب در فلوم و K: ضریب ثابت برابر با ۲/۲۵۵ است.

قمشی و همکاران (۲۰۰۷) آزمایش‌هایی با موانع استوانه‌ای به قطر ثابت در آب انجام دادند. آن‌ها چهار نوع موج مختلف در عرض فلوم مشاهده نمودند و روابط (۲) و (۳) را پیشنهاد دادند:

$$\frac{A}{H} = 1.41 N^{\frac{2}{3}} \frac{D}{L} \left(\frac{D}{P}\right)^{0.5} St^{-0.5} n^{\frac{2}{3}}, \frac{T}{D} \geq 5 \quad (2)$$

$$\frac{A}{H} = 0.078 N^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D}{P}\right)^{0.5} St^{-0.5} n^{\frac{2}{3}}, \frac{T}{D} < 5 \quad (3)$$

در اینجا T: فاصله‌ی عرضی موانع، L: عرض فلوم، n: نوع یا مد موج (بر اساس رابطه‌ی ۵) است. بقیه‌ی پارامترها نیز مانند پارامترهای رابطه (۱) می‌باشند.

جعفری و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق آزمایشگاهی با به‌کارگیری موانع با سه قطر مختلف، ده نوع موج را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمودند و رابطه‌ی (۴) را برای محاسبه‌ی دامنه نسبت به عمق جریان امواج عرضی ناشی از گردابه ارائه نمودند:

$$\frac{A}{H} = \frac{K}{\left(\frac{L}{b}\right)^{0.37} N^{0.3} S^{0.62} \left(\frac{P}{D}\right)^{0.93} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.79}} \quad (4)$$

پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۳) با انجام تحقیق آزمایشگاهی، چهار نوع موج را در حالت غیرمستغرق برای موانع منشوری در آرایش‌های مختلف در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمود. وی همچنین روابطی بین عدد استروهل و نسبت دامنه به ارتفاع آب در حالت تشدید پیشنهاد نمود.

رابطه‌ی (۵) ارتباط بین طول موج (λ)، عرض فلوم (b) و مد موج (n) را نشان می‌دهد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰):

$$b = n\lambda/2 \quad (5)$$

دامنه‌ی امواج عرضی مشاهده شده در این پژوهش برای موج عرضی مد یک و مد دو ثبت شده است. با توجه به رابطه‌ی (۵) در موج عرضی مد یک طول موج دو برابر عرض فلوم و در موج عرضی مد دو طول موج برابر عرض فلوم می‌باشد.

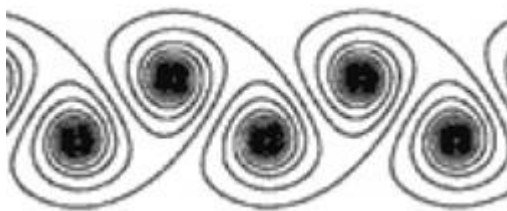
## مقدمه

وجود موانعی هم‌چون پایه‌های پل، پایه و شمع‌های اسکله‌های ساحلی، گیاهان آبی در مسیر جریان آب می‌تواند در جریان اغتشاش ایجاد کند. با عبور جریان از این موانع امواجی موسوم به نعل اسبی در بالادست موانع و اغتشاشی موسوم به گردابه<sup>۱</sup> (شکل ۱) در پایین‌دست موانع شکل می‌گیرد. امواج عرضی<sup>۲</sup> از هم‌پوشانی گردابه‌های ایجاد شده از هر مانع پدید می‌آید (طاهریان و همکاران، ۱۳۹۳). در امواج عرضی نوسان ذرات عمود بر راستای انتشار موج است. این امواج توانایی انتشار در داخل حجم یک توده گاز یا مایع را ندارند و در سطح ایجاد می‌شوند (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۵). هنگام برخورد جریان به لبه‌ی جلویی جسم (موانع) سرعت صفر شده و فشار ذره از فشار اولیه‌ی سیال به فشار دینامیک در نقطه‌ی سکون افزایش می‌یابد. فشار بالای سیال در نزدیکی مرز جسم جامد سبب تشکیل لایه‌ی مرزی<sup>۳</sup> در طرفین جسم جامد می‌شود. با رشد لایه‌ی مرزی و پس از طی مسافتی روی مرز جسم جامد در اثر گرادیان فشار پدیده‌ی جداسازی خطوط جریان رخ می‌دهد. در پایین‌دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله<sup>۴</sup> و گردابه به وجود می‌آید (انتظاری، ۱۳۸۱).

هنگامی که فرکانس گرداب ناشی از موانع با فرکانس امواج برابر شوند، حالت تشدید<sup>۵</sup> پدید می‌آید و سبب ایجاد نوسان‌های شدید با حداکثر دامنه می‌شود، در این هنگام موج عرضی به وجود می‌آید. این امواج در مدهای مختلف در کانال تشکیل می‌شوند. بیشتر یافته‌ها و تحقیقات در مورد گردابه‌های ناشی از عبور سیالات از پیرامون موانع موجود در مسیر جریان به گازها مربوط می‌شود که بیشتر تحقیقات در این زمینه توسط افرادی چون فیتزهاگ<sup>۶</sup> (۱۹۷۳)، بلوین و برسلر<sup>۷</sup> (۱۹۹۳)، زوکاسکاس و همکاران<sup>۸</sup> (۱۹۸۸) صورت گرفته است.

وانگ و ژو<sup>۹</sup> (۲۰۰۴) بر روی مشخصات امواج تولیدشده از گرداب پشت موانع قابل ارتجاع در تکیه‌گاه‌های ثابت، تحقیقاتی را انجام دادند که دامنه‌ی امواج در موانع با مقطع مربعی دو برابر دامنه‌ی امواج تولید شده در موانع با مقطع دایره‌ای بوده است. پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با تشکیل گرداب و پدیده‌های مرتبط به آن در محیط آب در مقایسه با گازها کمتر است. زیما و اکرم<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۲) تحقیقاتی را در دبی ثابت و با موانع استوانه‌ای به قطر ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلی‌متر در آب انجام دادند و

- 1- Vortex
- 2- Transverse wave
- 3- Boundary layer
- 4- Wake
- 5- Resonance
- 6- Fitz Hugh
- 7- Blevins and Bressler
- 8- Zukauskas et al.
- 9- Wang and Zhou
- 10- Zima and Ackermann



شکل ۱- شماتیک گرداب ایجادشده از برخورد باد به مانع استوانه‌ای



شکل ۲- موانع منشوری با مقطع مثلث در حالت مستغرق

برخورد جریان به رأس و برخورد جریان به ضلع در کانال چیده شده‌اند. این موانع به دو حالت موازی و زیگزاگی و در دو حالت موج نوع یک و موج نوع دو (شکل ۳) مقایسه شدند. جدول (۱) آرایش‌های مختلف موانع به کار گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. موانع در هشت ردیف چیده شده‌اند که تعداد ردیف‌ها ( $N$ ) و تعداد آزمایش‌های انجام شده در هر آرایش آورده شده است.

موانع در ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری قرار داده شد، سپس دبی ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه به کمک دستگاه دبی سنج و دو شیرفلکه‌ی تعبیه شده برای تنظیم ورود آب به فلوم وارد فلوم شد. پس از ورود آب به فلوم، دامنه‌ی امواج در ارتفاع‌های مختلف آب که با بالا و پایین بردن دریچه فلوم تغییر می‌کرد اندازه‌گیری شده و بیشترین دامنه در هر دو مد یک و دو ثابت شده و موانع مستغرق شدند، سپس ارتفاع موانع را کاهش داده تا موج محو شود. در هر آزمایش ارتفاع موانع، دامنه و فرکانس امواج در حالت مستغرق برای هر دو مد ثبت شده است. به‌منظور تعیین دامنه، از تغییرات ارتفاع آب در سه قسمت ابتدایی، میانی، انتهایی موانع به کمک خط کش اندازه‌گیری شد. برای تعیین فرکانس گرداب ناشی از موانع، معکوس میانگین مدت زمان ده نوسان آب اندازه‌گیری شد. برای مستغرق سازی موانع، نخست ارتفاع آب را به کمک دریچه در بیشترین دامنه‌ی جریان در حالتی که موانع آزاد هستند قرار داده و سپس موانع در حالت استغراق صفر قرار گرفتند، از آن پس در هر مرحله با گام‌های پنج میلی‌متری ارتفاع موانع کاهش داده شد و این روند تا زمانی که موج عرضی وجود داشت ادامه پیدا کرد.

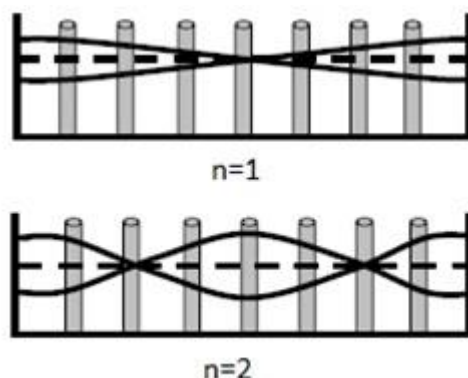
برای به دست آوردن عدد استروهمال ( $St$ ) از رابطه‌ی (۶) استفاده شده است که در این رابطه،  $f$ : فرکانس موانع،  $D$ : ضلع موانع که در هر دو حالت برخورد جریان به ضلع و رأس یکسان بوده است و  $U$ : سرعت جریان می‌باشد (قمشی و همکاران، ۲۰۰۷).

$$St = f \times D / U \quad (6)$$

در این پژوهش، هدف، بررسی بیشترین دامنه‌ی امواج عرضی ایجاد شده، هنگامی که موانع با آرایش‌های مختلف مستغرق شده‌اند، می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفته است. به‌منظور دست‌یابی به اهداف این پژوهش، از فلومی مستطیلی به عرض ۷۲/۵ سانتی‌متر و طول شش متر درحالی که کف فلوم به‌منظور مستغرق سازی موانع بالا آمده است، استفاده شد. این بالا آمدگی کف فلوم جهت تغییر ارتفاع موانع صورت گرفته است. جریان با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه وارد فلوم شده است. برای تغییر ارتفاع و سرعت آب، دریچه‌ی کشویی در انتهای فلوم تعبیه شده است. برای ایجاد امواج عرضی در کانال از هشت ردیف مانع چوبی با مقطع مثلث (شکل ۲) به ضلع ۲۵ میلی‌متر در فواصل ۱۲۰ در ۱۲۰ میلی‌متر استفاده شد که موانع به دو شکل



شکل ۳- موج نوع یک در بالا و موج نوع دو در پایین (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰)

جدول ۱- آرایش‌های مختلف موانع منشوری با مقطع مثلثی

تعداد آزمایش	N	علامت اختصاری	نوع جریان (n)	فاصله موانع از هم (mm)	چینش	حالت برخورد جریان
۱۱	۶	Ei-120n1	۱	۱۲۰	موازی	به رأس
۱۱	۶	Ei-120n2	۲	۱۲۰	زیگزاگی	
۶	۵	Es-120n1	۱	۱۲۰	موازی	به ضلع
۷	۵	Es-120n2	۲	۱۲۰	زیگزاگی	
۹	۶	Fi-120n1	۱	۱۲۰	موازی	به ضلع
۵	۶	Fi-120n2	۲	۱۲۰	زیگزاگی	
۱۵	۵	Fs-120n1	۱	۱۲۰	موازی	به ضلع
۷	۵	Fs-120n2	۲	۱۲۰	زیگزاگی	

در مجموع ۷۱ آزمایش انجام شد، تفاوت داده‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از رابطه‌ی پورمحمدی محاسبه شد. میانگین این اختلاف در نتایج حاصل ۰/۰۳ بوده است. از آنجاکه این اختلاف زیاد است از این رو نمی‌توان معادله‌های مربوط به حالت آزاد را برای حالت مستغرق استفاده کرد.

با توجه به نتایج سایر محققین و بررسی‌های انجام شده در این تحقیق پارامترهای مؤثر در تشکیل موج عرضی در پژوهش حاضر بدین شرح است:

$$\emptyset(D, P, b, N, n, H, u, f, fs, g, Hs, \Gamma, \rho, \mu, \lambda, A) = 0 \quad (7)$$

در این رابطه D: قطر موانع منشوری با طول ضلع موانع، P: فاصله‌ی ردیف‌های موانع از هم،  $\Gamma$ : شکل و آرایش موانع، b: عرض فلوم، N: تعداد موانع در یک ردیف، n: نوع جریان، Q: دبی جریان، A: دامنه‌ی موج، H: عمق جریان، U: سرعت جریان، f: فرکانس موج، دامنه‌ی موج عمود بر جریان،  $f_s$ : فرکانس گرداب ناشی از موانع، g: شتاب جاذبه،  $\mu$ : لزجت دینامیکی، p: چگالی سیال،  $\lambda$ : طول موج، H: ارتفاع موانع،  $H_s$ : ارتفاع استغراق موانع می‌باشد. از آنجاکه فاصله‌ی طولی و عرضی موانع برابرند، از به کار بردن هر دو در معادله صرفه نظر شده است. به دلیل ثابت بودن دبی جریان از به کار بردن آن در رابطه (۷) چشم‌پوشی شد.

## نتایج و بحث

در هنگام تشکیل امواج با بیشترین دامنه، تشدید صورت گرفته است، در این هنگام با مستغرق سازی موانع، دامنه‌ی تشدید تغییر می‌کند.

در این پژوهش، منظور از دامنه‌ی نسبی، دامنه نسبت به عمق جریان است.

شکل‌های (۴) و (۵)، دامنه‌ی نسبی امواج به درصد استغراق موانع در حالت‌های موازی و زیگزاگی در هر دو مد یک و دو را نشان داده و دو شکل برخورد جریان به رأس و ضلع را مقایسه کرده است. با توجه به این شکل‌ها دامنه‌ی نسبی امواج با افزایش درصد استغراق کاهش یافته است و بیشترین دامنه‌ی نسبی در حالتی که استغراق موانع صفر هستند مشاهده شده است.

با مقایسه‌ی بیشترین دامنه‌ی نسبی آرایش‌های مختلف به شکل نمودار ستونی (شکل ۶)، بیشترین دامنه‌ی نسبی که نشان از هم‌پوشانی بهتر گرداب‌های حاصل از موانع است، در آرایش زیگزاگی برخورد جریان به ضلع مشاهده شد. این نسبت به‌اندازه‌ی ۰/۱۷ در مد یک و ۰/۱ در مد دو است. کمترین دامنه‌ی نسبی مربوط به آرایش زیگزاگی در حالت برخورد جریان به رأس برای هر دو مد است.

دامنه‌ی نسبی آزمایش‌های انجام‌شده با رابطه‌ی پورمحمدی (۱۳۹۳) که برای موانع با مقطع مثلثی در آرایش‌های مشابه با آرایش موانع مورد بررسی در این پژوهش در حالات آزاد مقایسه شد.

که  $a$  و  $b$  و  $c$  و  $d$  ثابت‌های توانی و  $k$  ضریب ثابت معادله است. به منظور پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی تشدید در حالت مستغرق، از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و رابطه‌ی (۱۰) به دست آمد:

$$\frac{A}{H} = \frac{0.023}{\left(\frac{H_s}{H}\right)^{0.496} N^{9.414} n^{0.08} St^{7.733}} \quad (10)$$

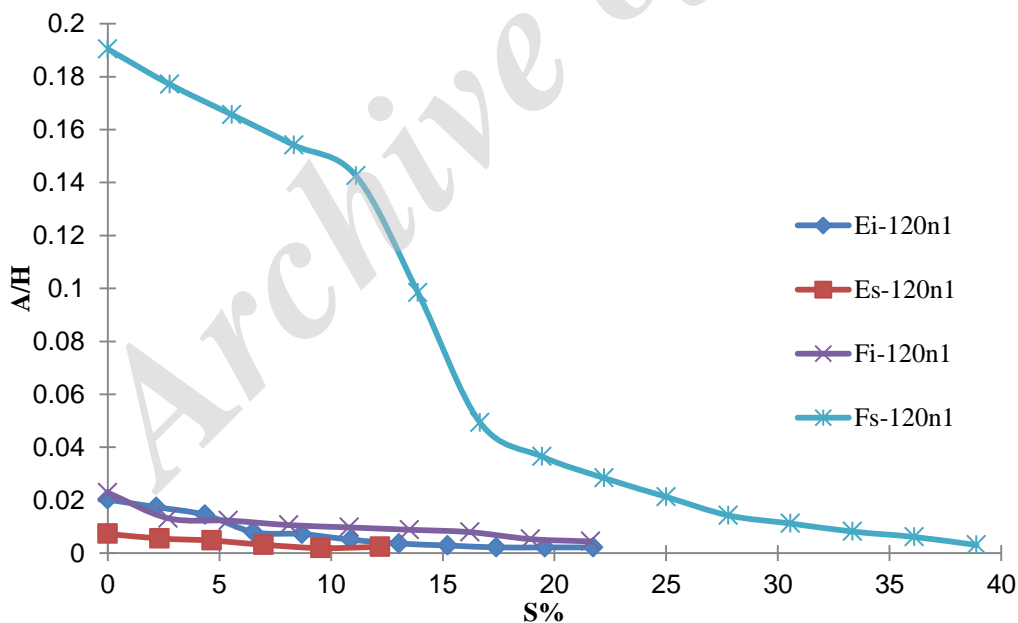
در شکل ۷، دامنه‌ی نسبی به دست آمده از این رابطه را با دامنه‌ی نسبی نتایج آزمایشگاهی به شکل لگاریتمی مقایسه شده است. با توجه به رابطه (۱۰) با افزایش میزان استغراق دامنه‌ی نسبی کاهش داشته است. با توجه به این رابطه عدد استروهمال و تعداد موانع در هر ردیف بیشترین اثر را بر روی دامنه‌ی نسبی داشته است. در واقع عدد استروهمال نقش فرکانس و مد جریان را در رابطه نشان می‌دهد و تعداد موانع در هر ردیف، نشان‌گر تأثیر چینش موانع می‌باشد. برای به دست آمدن رابطه از ۸۰ درصد داده‌ها و برای صحت سنجی از ۲۰ درصد مابقی داده‌ها استفاده شد. دامنه‌ی نسبی به دست آمده از معادله به طور میانگین ۰/۰۱ با دامنه‌ی نسبی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه اختلاف داشته و خطای به دست آمده ۰/۵ می‌باشد. مجذور ضریب همبستگی معادله‌ی به دست آمده ۰/۸۶۵ می‌باشد.

برای به دست آوردن رابطه‌ای برای دامنه‌ی نسبی جریان از پارامترهای رابطه‌ی (۷) استفاده شد و متغیرهای بدون بعد رابطه‌ی (۸) به دست آمد.

$$\frac{A}{H} = \Phi\left(\frac{fs}{f}, \frac{P}{D}, \frac{\rho UD}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gH}}, n, \frac{H_s}{H}, \frac{\lambda}{b}, \Gamma, N, \frac{fs D}{U}\right) \quad (8)$$

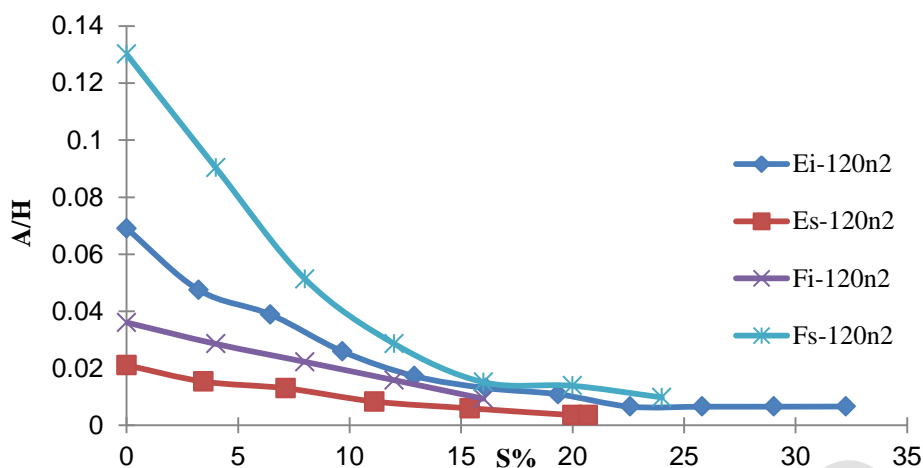
در این رابطه، عدد رینولدز  $Re = \frac{\rho UD}{\mu}$ ، عدد فرود  $Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}}$  و عدد استروهمال  $St = \frac{fs D}{U}$  می‌باشد. به دلیل کم اثر بودن عدد فرود و عدد رینولدز در دامنه‌ی نسبی، این اعداد بی‌بعد از رابطه حذف شدند. از آنجاکه موج عرضی مورد بررسی در حالت تشدید می‌باشد نسبت  $fs/f$  برابر با یک بوده و از رابطه حذف می‌شود. با توجه به رابطه‌ی (۵) نسبت  $\lambda/b$  در مد جریان وجود دارد از این رو این نسبت نیز حذف شده است. به دلیل ثابت بودن  $P/D$  در تمامی حالت‌ها، از به کار بردن آن در معادله‌ی نهایی صرفه نظر شده و در نهایت با به کارگیری تئوری باکینگهام و تحلیل ابعادی رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید. در این رابطه،  $A/H$ : دامنه‌ی نسبی و  $H_s/H$ : نسبت استغراق است.

$$\frac{A}{H} = k \left(\frac{H_s}{H}\right)^a N^b n^c St^d \quad (9)$$

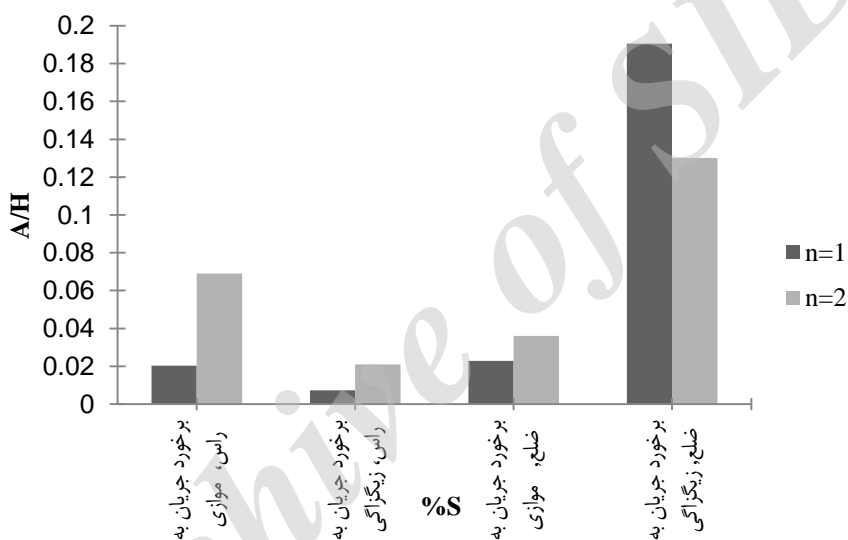


شکل ۴- نمودار تغییرات دامنه نسبی موج به تغییرات درصد استغراق، مد یک

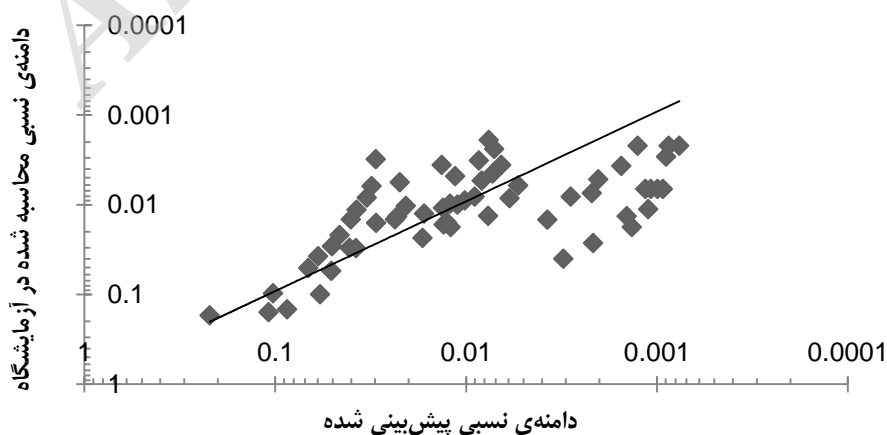
مصطفوی و همکاران: بررسی بیشترین دامنه‌ی نسبی موج ایجاد شده از...



شکل ۵- نمودار تغییرات دامنه نسبی موج به تغییرات درصد استغراق، مد دو



شکل ۶- مقایسه‌ی بیشترین دامنه‌ی نسبی در آرایش‌های مختلف



شکل ۷- نمودار تغییرات دامنه نسبی به‌دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی به تغییرات دامنه نسبی به‌دست آمده از رابطه‌ی (۹)

### نتیجه گیری

جریان به ضلع و در چینش زیگزاگی در فواصل ۱۲۰ میلی متری موانع از هم بود که برای موج عرضی مد یک ۰/۲ و برای مد دو ۰/۱۴ ثبت شد. کمترین دامنه‌ی نسبی مربوط به موانع با مقطع مثلث در حالت برخورد جریان به رأس و چینش زیگزاگی در هر دو مد یک و دو بود. در این پژوهش موانع نخست در حالت استغراق صفر قرار گرفتند و سپس با کاهش ارتفاع موانع درصد استغراق تا آنجا که موج عرضی قابل دیدن باشد افزایش یافته است. بیشترین درصد استغراق در مد یک مربوط به حالت برخورد جریان به ضلع موانع با مقطع مثلث و در چینش زیگزاگی به میزان ۳۸/۸۹٪ بوده، درحالی که بیشترین درصد استغراق برای مد دو مربوط به حالت برخورد جریان به رأس موانع با مقطع مثلث و در چینش موازی به میزان ۳۲/۲۶ درصد بوده است. در این تحقیق، تحلیل‌های آماری برای محاسبه و مقایسه‌ی دامنه‌ی نسبی امواج عمود بر جریان در حالت تشدید صورت گرفت و با به کارگیری تحلیل ابعادی و استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، رابطه‌ای برای محاسبه‌ی این دامنه‌ی نسبی ارائه شد.

هنگامی که آب به موانع در سر راهش برخورد می‌کند، اغتشاشی موسوم به گردابه ایجاد می‌شود، با هم فرکانس شدن فرکانس گرداب ناشی از موانع و فرکانس طبیعی امواج پدیده‌ی تشدید رخ می‌دهد و امواج عرضی با طول موج‌های متفاوت به شکل منظم در کانال تشکیل می‌شود. امواج عرضی مورد مطالعه در این پژوهش موج عرضی مد یک با طول موج دو برابر عرض فلوم و موج عرضی مد دو با طول موج برابر با عرض فلوم بوده است.

بیشتر مطالعات انجام شده در خصوص پدیده‌ی امواج عرضی مربوط به موانع استوانه‌ای در حالت آزاد می‌باشد. در این پژوهش با به کارگیری دو شکل برخورد جریان به ضلع و رأس موانع با مقطع مثلث و آرایش موازی و زیگزاگی در دو مد یک و دو به بررسی دامنه‌ی نسبی (دامنه نسبت به عمق جریان) جریان در حالت مستغرق در هنگام تشدید پرداخته شد. بیشترین دامنه‌ی نسبی موج مشاهده شده در آزمایش‌ها مربوط به موانع با مقطع مثلثی در حالت برخورد

### منابع

- ۱- انتظاری، ع. ۱۳۸۱. مکانیک سیالات، ترجمه چاپ پنجم، نشر نوپردازان، تهران، ۷۴۴ صفحه.
- ۲- پورمحمدی، م. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی امواج عمود بر جریان ناشی از کشش ورتکس پشت موانع منشوری شکل در کانال‌های روباز. پایان نامه دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه چمران، اهواز.
- ۳- پورمحمدی، م. قمشی، م. موسوی جهرمی، س. ح. کاشفی پور، س. م. و م. فتحی مقدم، ۱۳۹۵. بررسی تاثیر نوع شکل مانع بر روی خصوصیات امواج عرضی: مجله علوم و مهندسی آبیاری ۳۹ (۱): ۲۰-۱۱.
- ۴- جعفری، ا. قمشی، م. بینا، م. و س. م. کاشفی پور. ۱۳۹۰. معادله‌ای جدید جهت به دست آوردن عدد استروهل موج ناشی از عبور آب از موانع استوانه‌ای. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۳۴ (۱): ۵۴-۴۵.
- ۵- طاهریان، ف. قمشی، م. جاسمی زرگانی، س. و ن. پوستی زاده. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر امواج عرضی نوع ۱ و ۲ بر غلظت رسوبات معلق پایین دست موانع در مجاری روباز. نشریه دانش آب و خاک، ۲۴ (۳): ۱۴۳-۱۳۳.
- 6- Blevins, R.D. and M.M. Bressler. 1993. Experiments on acoustic resonance in heat exchanger tube bundles. *Journal of Sound Vib*, 163: 503-533.
- 7- Fitz-hugh, J.S. 1973. Flow induced vibration in heat exchangers. " proc. UKAEA/NPL International Symposium on vibration problems in industry, Keswick, England, 427: 1-17.
- 8- Ghomeshi, M., Mortazavi, S., and R. Falcorer. 2007. Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels. *Journal of Applied Science*, 7: 3927-3924.
- 9- Jafari, A., Ghomeshi, M., Bina, M. and S.M. Kashfipour. 2010. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinder in open channels, *Journal of food*, 8 (2): 949-955.
- 10- Wang, Z.J. and Y. Zhou, 2004. Vortex-Induced Vibration Characteristics of an Elastic Square Cylinder on Fixed Supports. *Journal of Fluids Engineering*. *Journal of fluid engineering*, 127(2):241-249.
- 11- Zima, L. and N. Ackerman. 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 6: 596-603.
- 12- Zukauskas, A., Ulinskas, R. and V. Katinas. 1988. Flow Dynamics and flow-Induced Vibrations of Tube Banks. Published by Hemisphere Publishing Corp. New York, 290 pages.