معادله‌ای جدید جهت بدست آوردن عدد استروهال موج ناشی از عبور آب از موانع استوانه‌ای

احمد جعفری[1*]، مهدی قمشی[2]، محمود بینا[3] و سید محمود کاشفی پور[4]

۱*- نویسنده مسئول: دانش آموخته دکتری گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز و استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان. jafary_ahmad@yahoo.com

۲و۴- استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- دانشیار بازنشسته گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۱۴

چکیده

در مسیر حرکت آب در بسیاری از مواقع، مجموعه‌ای از موانع قرار می‌گیرد. به عنوان نمونه هایی از این موانع می‌توان به پایه‌های پل در مسیر رودخانه، پایه‌های اسکله در دریا و وجود گیاهان و درختان در بستر رودخانه اشاره نمود. با عبور آب از بین این موانع استوانه‌ای، در پائین دست آنها ورتکس ایجاد می‌شود. فرکانس این ورتکس‌ها با استفاده از عدد استروهال قابل محاسبه است. در شرایط خاصی که فرکانس طبیعی موج آب با فرکانس نیروی ورتکس با یکدیگر برابر می‌شود، حالت تشدید بوجود آمده و امواج با حداکثر دامنه در عرض مجرا شکل می‌گیرد. آزمایش‌های این تحقیق با استفاده از موانع استوانه‌ای با قطرهای مختلف و در دبی‌های متغیر، در یک فلوم مستطیلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت پذیرفت. آزمایش‌ها با فواصل مختلف موانع در ردیفها و همچنین فواصل متفاوت ردیفها، با آرایشهای موازی و زیگزاگی موانع انجام گرفت. هدف اصلی از انجام این تحقیق، بدست آوردن عدد استروهال مربوط به جریان آب عبوری از مجموعه موانع استوانه‌ای بوده است. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها این تحقیق، عدد استروهال محاسبه و با نتایج مربوط به تحقیقات قبلی مقایسه گردید که ارتباط نزدیکی وجود نداشت. چرا که در بیشتر تحقیقات قبلی، عدد استروهال مربوط به سیالاتی غیر از آب و یا مربوط به یک مانع استوانه‌ای بوده است. در پایان با استفاده از آنالیز ابعادی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، روابطی جهت محاسبه عدد استروهال در مجاری رو باز با مجموعه‌ای از موانع استوانه‌ای ارائه گردیده است.

کلید واژه ها: *فرکانس، ورتکس، مانع، عدد استروهال، مجاری روباز.*

مقدمه

با قرار گرفتن جسم جامد در مسیر حرکت سیال، پدیده جدایی خطوط جریان رخ داده و در پایین دست مانع استوانه‌ای ورتکس تشکیل می‌شود (شکل ۱). زمانیکه ورتکس‌ها بطور متناوب در دو سمت مانع ایجاد می‌شود، نیروهای تناوبی روی جسم ایجاد شده، که این نیروها متقابلاً از مانع به سیال وارد می گردد. ورتکس زمانی اتفاق می‌افتد که عدد رینولدز موانع که مطابق با رابطه (۱) تعریف می شود، در دو بازه $40 \le Re < 3\times10^5$ یا $3.5\times10^6 \le Re$ قرار می‌گیرد [۲]. در عدد رینولدز موانع، U سرعت متوسط جریان، D قطر موانع و υ لزجت سینماتیک سیال است.

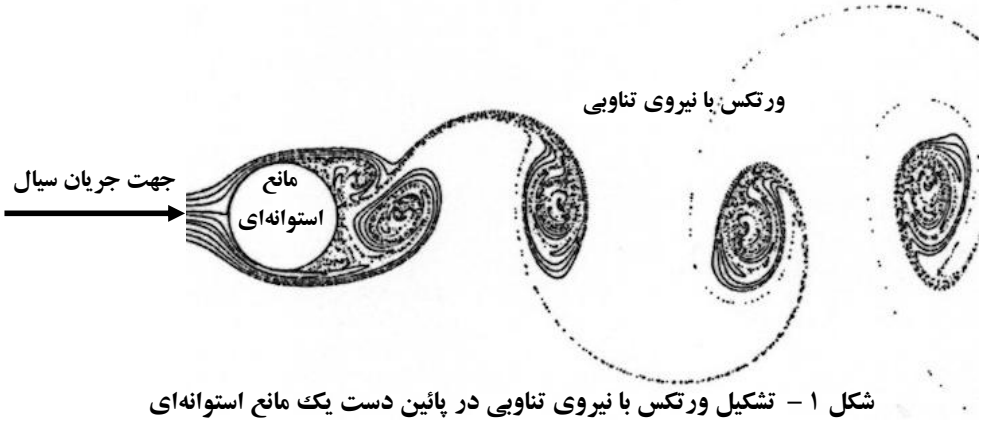
$$Re = UD/\upsilon \qquad (۱)$$

رابطه (۲) برای محاسبه فرکانس ورتکسها در پائین دست استوانه استفاده می‌گردد. در این رابطه U سرعت جریان آزاد، f_s فرکانس ورتکس و S عدد استروهال[1] بوده که تابعی از عدد رینولدز استوانه‌ها می‌باشد [۱۰]:

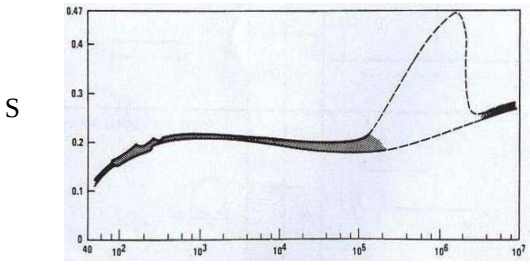
$$f_s = \frac{SU}{D} \qquad (۲)$$

اگر فرکانس نیروی تناوبی ناشی از ورتکس موانع (f_s) با فرکانس طبیعی نوسان امواج آب (f) برابر گردد، حالت تشدید بوجود آمده و امواج با حداکثر دامنه پدید می‌آید. دین و دالریمپل[2]

1.Strouhal number
2. Dean and Dalrymple



شکل ۱ – تشکیل ورتکس با نیروی تناوبی در پائین دست یک مانع استوانه‌ای



شکل ۲ – رابطه بین عدد استروهال (S) و عدد رینولدز (Re)، ارائه شده توسط لینهارد

با استفاده از تئوری امواج کم دامنه نشان دادند که طول موج (L)، دوره تناوب موج (T)، شتاب جاذبه زمین (g) و عمق جریان (H) با یکدیگر ارتباط دارند [۳]. با توجه به اینکه فرکانس موج عکس دوره تناوب است، می‌توان برای تخمین فرکانس موج از رابطه زیر استفاده نمود که در آن n شماره موج تولید شده و b عرض فلوم می باشد.

$$f = \left(\frac{gn}{4\pi b} \tanh \frac{n\pi H}{b} \right)^{1/2} \qquad (۳)$$

زیما و آسکرمان[1] تحقیقاتی را در دبی ثابت و با دو قطر مختلف در آب انجام دادند که به دلیل محدود بودن آزمایش‌ها و عرض فلوم، تنها امواج نوع یک و دو مشاهده شد و رابطه‌ای را برای محاسبه حداکثر دامنه نسبی امواج عرضی تولید شده در حالت تشدید، ارائه نمودند [۱۱].

قمشی و همکاران نشان دادند که برای T/D>۵ (T فاصله موانع در یک ردیف) با کاهش در مقدار T/D، دامنه موج افزایش می‌یابد ولی برای T/D<۵، با کاهش در مقدار T/D، دامنه موج کاهش می‌یابد. ضمناً برای P/D> ۴/۳ (P فاصله ردیفهای موانع از یکدیگر)، با کاهش در مقدار P/D، دامنه موج افزایش می‌یابد. این آزمایش‌ها با موانع به قطر ثابت در آب صورت گرفت و با انجام آزمایش‌ها چهار نوع موج مختلف در عرض فلوم مشاهده شد [۵].

جعفری و همکاران در تحقیقی آزمایشگاهی با استفاده از موانع با قطرهای مختلف (سه قطر)، ده نوع موج را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمودند [۶]. این محققین در مطالعه دیگری دامنه ده نوع موج عرضی را مورد بررسی قرار داده و رابطه‌ای برای محاسبه حداکثر دامنه نسبی امواج عرضی ناشی از ورتکس در جریان آزاد بر روی موانع ارائه نمودند [۷]. پراسانت و میتال[2] نیز تحقیقی را در زمینه ارتعاش ناشی از ورتکس مربوط به دو مانع استوانه‌ای، در اعداد رینولدز پائین انجام دادند [۹].

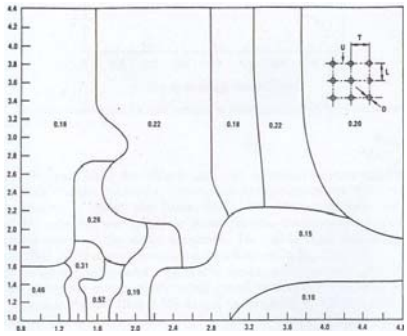
عدد استروهال

لینهارد[3] نموداری را برای تعیین عدد استروهال (S) با استفاده از عدد رینولدز (Re) برای گازها در جریانهای با عدد ماخ کوچک ارائه کرده است که با استفاده از آن، برای محدوده بزرگی از عدد رینولدز مقدار عدد استروهال تقریباً ۰/۲ خواهد بود. این نمودار در شکل ۲ نشان داده شده است [۸].

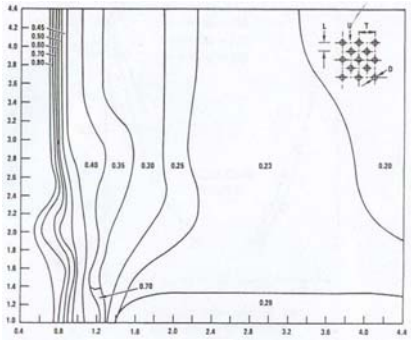
فیتزها[4] ادعا کرد که در جریان گاز، برای اعداد رینولدز استوانه بین ۳۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰، در حالتی که یک استوانه وجود داشته باشد، عدد استروهال حدود ۰/۲ می باشد و برای یک گروه از استوانه‌ها مقدار عدد استروهال به آرایش، قطر و فاصله قرارگیری استوانه‌ها از یکدیگر بستگی دارد [۴].

1. Zima and Ackermann

2. Prasanth and Mittal
3. Lienhard
4. Fitz-hugh



(الف)



(ب)

شکل ۳ – بدست آوردن عدد استروهال در جریان سیالات گازی:
(الف) آرایش ردیفی موانع و (ب)آرایش زیگزاگی موانع، ارائه شده توسط فیتزها

نمودارهای مربوط به فیتزها برای آرایشهای زیگزاگی و موازی موانع، در شکل ۳ ارائه گردیده است. همانگونه که نشان داده شده، عدد استروهال با فاصله موانع در یک ردیف (T) و فاصله بین ردیفهای موانع (P) ارتباط دارد.

عزیزی و قمشی در یک فلوم آزمایشگاهی، آزمایش‌هایی را جهت محاسبه عدد استروهال در جریان آب با مجموعه موانع استوانه ای انجام دادند. در این آزمایش‌ها قطر موانع و دبی جریان ثابت بوده و چهار نوع موج عرضی در فلوم تشکیل شده، ولی در حالت جریان مستغرق، موجی مشاهده نگردیده است. آنها روابط ۴ و ۵ را برای محاسبه عدد استروهال ارائه کرده‌اند. رابطه ۴ مربوط به P/D کوچکتر از پنج بوده و K ضریب ثابت، برای آرایش زیگزاگی موانع برابر ۱/۴۸ و برای آرایش موازی موانع ۱/۲۱ می باشد. N تعداد استوانه ها در یک ردیف است [۱].

$$S=\frac{k}{Ln(\frac{T}{D})\cdot(\frac{P}{D}.N)^{\frac{1}{2}}} \quad , \quad \frac{P}{D}<5 \qquad (۴)$$

رابطه ۵ مربوط به P/D بزرگتر از پنج می باشد که در آن ثابت معادله (C)، برای آرایش ردیفی ۰/۴۳ و برای آرایش زیگزاگی ۰/۵۲ می باشد.

$$S=C\cdot\sqrt[3]{\frac{(P/D)}{(T/D)^2\cdot N}} \quad , \quad P/D>5 \qquad (۵)$$

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی عدد استروهال مربوط به جریان آب عبوری از مجموعه موانع استوانه‌ای با استفاده از موانع با قطرهای مختلف و در دبیهای متغیر بوده است.

آزمایش‌ها و مشاهده‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت پذیرفت و جهت انجام این آزمایش‌ها از فلومی به طول ۶ متر، عرض ۰/۷۲متر و ارتفاع ۰/۶متر استفاده گردید (شکل ۴–الف). جریان پس از عبـــور از یـک مخـزن آرام کننده وارد فلـوم کنترل عمق و سرعت توسط سرریز کشویی که در انتهای فلوم نصب شده است صورت می گرفت (شکل ۴–ب). در هر آزمایش ارتفاع سرریز کشویی از یک

الف



ب



شکل ۴ – (الف): فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر و (ب): دریچه کشویی در انتهای فلوم

مقدار حداکثر (متناسب با عمق جریانی که امواج عمود بر جریان شکل می‌گیرد) تا ارتفاع صفر تغییر می کرد.

بده جریان بوسیله یک جریان سنج که در سیستم ورودی فلوم نصب شده، اندازه‌گیری و تنظیم می‌گردید (شکل ۵–الف). جهت انجام این آزمایش‌ها استوانه های چوبی با قطرهای مختلف ۵، ۱۲ و ۲۵ میلیمتر آماده گردید (شکل۵–ب).

به منظور تثبیت موانع استوانه‌ای در مسیر جریان، از صفحات پلکسی گلاس استفاده شد.

به این ترتیب که تمامِ سطح این صفحات با فواصل طولی و عرضی، شبکه بندی و سپس رِزوه شد تا بتوان موانع استوانه‌ای را روی آنها پیچ نمود. این صفحات درکف فلوم آزمایشگاهی قرار می‌گیرند، در نتیجه می توان موانع استوانه‌ای را با فواصل طولی (P) و عرضی (T) مختلف در دو آرایش ردیفی و زیگزاگی روی این صفحات نصب نمود. استوانه‌های چوبی نصب شده در کف فلوم در آزمایش‌ها تحقیق حاضر، در شکل ۵–ج نشان داده شده است. آرایش‌های ردیفی و زیگزاگی موانع و فواصل طولی و عرضی آنها در شکل ۶ آمده است.

در جدول ۱، مشخصات کلی آزمایش‌های انجام شده در تحقیق آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، تعداد ۷۶۰ آزمایش انجام شده که در ۱۱۹ آزمایش، جریان بر روی موانع مستغرق بوده است. در این آزمایشات ۳۸ نوع آزمایش وجود دارد که در آنها پارامترهای D, T, P, N، دبی و آرایش موانع یکسان می باشد. در این جدول Q دبی جریان بر حسب لیتر بر ثانیه است.

در هر نوع آزمایش، با تغییر عمق جریان به وسیله دریچه انتهایی فلوم ، امواج مختلفی در عرض فلوم تشکیل شد. این امواج عمود بر جریان بصورت امواج عرضی، خطی(با دامنه کم) و ایستا طبقه بندی می‌شود. چنانچه مجموعه‌ای از موانع استوانه‌ای



(الف)

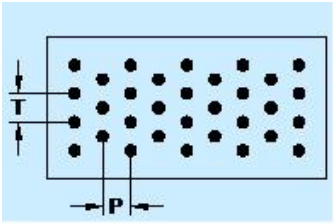


(ب)

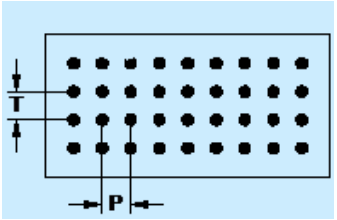


(ج)

شکل ۵ – (الف): جریان سنج نصب شده در ورودی فلوم، (ب): موانع استوانه‌ای با قطرهای مختلف و (ج): استوانه‌های چوبی در کف فلوم



(الف)



(ب)

شکل ۶– آرایشهای مختلف استوانه های چوبی، (الف): زیگزاگی و (ب): موازی

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر

نوع آزمایش	تعداد آزمایش‌های مستغرق	تعداد آزمایش‌ها	Q (l/s)	N	آرایش	P (mm)	T (mm)	D (mm)
1	2	18	2.46	22.5	زیگزاگی	30	30	5
2	10	64	5.36					
3	12	39	10					
4	4	7	15					
5	12	18	20	22	موازی	60	30	
6	13	35	5.43					
7	11	30	10					
8	5	13	15					
9	5	12	20	11.5	زیگزاگی	60	60	
10	5	13	5.44					
11	1	7	10					
12	1	5	15					
13	5	12	20	11.5	زیگزاگی	60	60	12
14	-	25	5					
15	-	22	9.81					
16	4	21	24.5	23	موازی	60	30	
17	-	22	5					
18	6	26	11.2					
19	2	20	17					
20	4	18	24.5	6	زیگزاگی	60	120	
21	-	13	5.42					
22	-	17	15					
23	-	25	20					
24	4	24	25	12	موازی	60	60	
25	-	14	2.2					
26	-	21	7					
27	1	15	12					
28	4	17	20					25
29	8	26	25					
30	-	17	6	12	موازی	120	60	
31	-	28	15					
32	1	21	25					
33	-	13	5.5	6	زیگزاگی	120	120	
34	1	17	12					
35	-	20	25					
36	-	8	4	3.5	زیگزاگی	120	180	
37	-	15	12					
38	-	22	24.5					
	119	760		تعداد کل آزمایش‌ها				

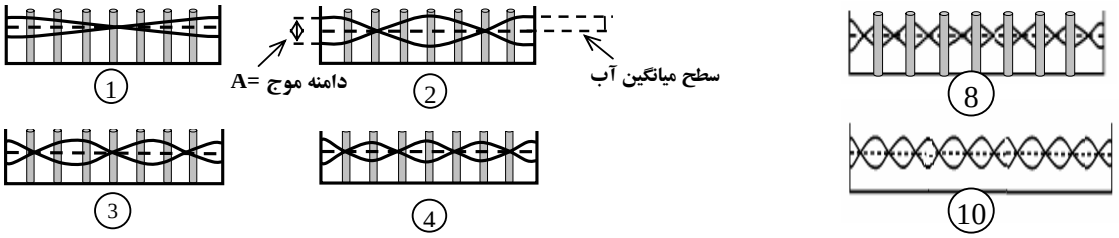
بصورت عمود بر مسیر جریان آب نصب شوند، از همپوشانی ورتکس ایجاد شده از موانع، امواج سطحی که راستای انتشارشان عمود بر جهت جریان است، تشکیل می‌شود. شرایط تشدید، در حالت تشکیل امواج عمود بر جریان با حداکثر دامنه رخ می‌دهد. بدلیل وسعت آزمایش‌ها، ده نوع موج عرضی مشاهده گردید. در بیشتر گزارش‌های ارائه شده توسط سایر محققین، بدلیل محدود بودن آزمایش‌ها، حداکثر چهار نوع موج عرضی گزارش شده است. در این تحقیق در حالت جریان مستغرق نیز در برخی از حالات موج عرضی تشکیل گردید. این در حالی می‌باشد که در بیشتر گزارش‌های سایر محققین بدلیل محدود بودن آزمایش‌ها، در جریان مستغرق موجی تشکیل نیافته بود. نوع موج با حرف n و شماره گذاری آنها از ۱ تا ۱۰ صورت پذیرفت. در شکل ۷ چند نوع از این امواج تشکیل یافته در عرض فلوم، نشان داده شده است. رابطه ۶ نشان دهنده رابطه بین نوع موج، طول موج و عرض فلوم می باشد. در واقع نصف عدد نوع موج (n/2) نشان دهنده آن است که عرض فلوم چند برابر طول موج عرضی می باشد.

$$\frac{n}{2}=\frac{b}{\lambda} \qquad (۶)$$

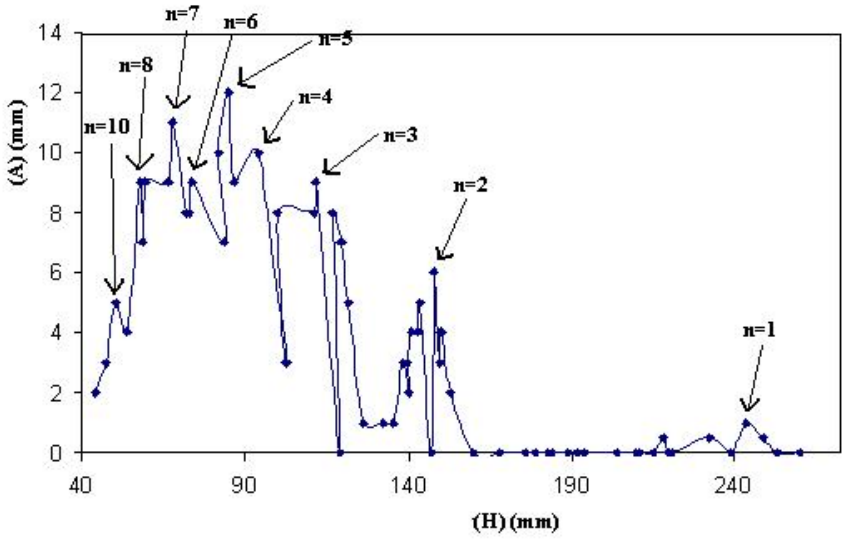
در شکل ۸ نمودار تغییرات دامنه امواج (A) در مقابل عمق جریان (H) در آزمایش‌های نوع دو به عنوان نمونه آورده شده است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در هر نوع آزمایش با ثابت بودن سایر پارامترها، با کاهش در عمق جریان امواج مختلفی تشکیل یافت که در حالات خاصی امواج با حداکثر دامنه بوجود آمد. در این حالت، تشدید صورت گرفته و از نظر فیزیکی فرض بر این است که فرکانس نیروی تناوبی ناشی از ورتکس (fs) با فرکانس طبیعی موج



شکل ۷ – برخی از امواج تشکیل یافته در عرض فلوم (امواج شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۸ و ۱۰)



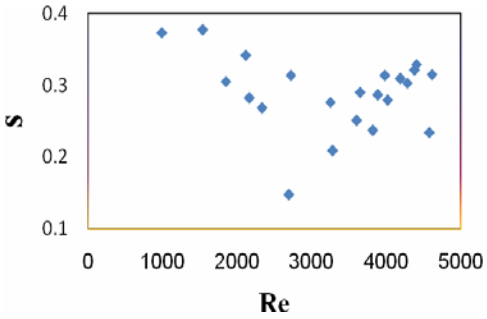
شکل ۸ – تغییرات دامنه امواج (A) در مقابل عمق جریان (H) در آزمایش‌های نوع دو

عرضی در کانال (f) برابر گردیده است. جهت انجام تجزیه و تحلیل های بیشتر، در هر نوع آزمایش و برای هر نوع موج عرضی، مشخصات آزمایش‌های (۱۲۶ آزمایش) مربوط به موج با حداکثر دامنه نسبی، استخراج گردید. در هر کدام از آزمایش‌ها، فرکانس طبیعی موج با اندازه گیری تعداد نوسانات و زمان مربوط به این نوسانات، بدست آمد. فرکانس بدست آمده با فرکانس محاسبه شده از رابطه ۳ (رابطه دین و دالریمپل) مقایسه گردید و ارتباط بسیار نزدیکی برقرار بود. با توجه به برابری f با fs در حالت تشدید، فرکانس‌های اندازه گیری شده (f) به جای fs در رابطه ۲ قرار داده شد و عدد استروهال برای این نقاط با حداکثر دامنه نسبی بدست آمد. در برخی از آزمایش‌های نوع موج دقیقاً قابل تشخیص نبود و بدلیل آنکه در رابطه ۳ به نوع موج نیاز داریم، داده‌های مربوط به آن آزمایش‌ها حذف گردید.

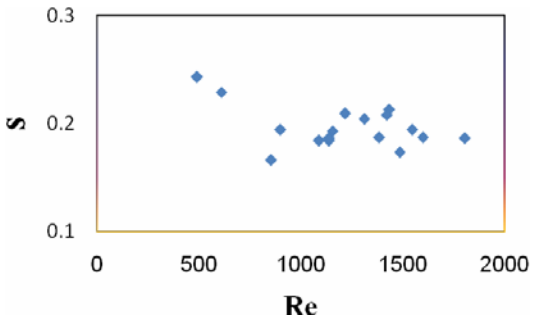
در مرحله بعد با استفاده از نمودارهای لینهارد و فیتزها که در ابتدای مقاله ارائه شده‌اند، اعداد استروهال محاسبه گردید تا با اعداد استروهال اندازه گیری شده مقایسه گردد. دامنه تغییرات عدد رینولدز موانع در این آزمایشات از ۱۵۲ تا ۵۹۸۶ متغیر بود. با توجه به دامنه عدد رینولدز و طبق نمودار لینهارد، برای تمامی این آزمایش‌ها، عدد استروهال حدود ۰/۲ بدست می‌آید. با استفاده از P/D و T/D و نمودارهای فیتزها نیز عدد استروهال محاسبه گردید که حدود ۰/۲ تا ۰/۲۳ بدست آمد.

بین نتایج مربوط به نمودارهای لینهارد و فیتزها با نتایج مربوط به اعداد استروهال اندازه گیری شده در این تحقیق، رابطه نزدیکی وجود نداشت. احتمالاً این عدم تطابق به این نکته بر می‌گردد که نمودارهای مذکور مربوط به سیال گاز بوده و در شرایط این تحقیق، یعنی سیال آب با مجموعه موانع استوانه‌ای کاربرد ندارد. در نمودار لینهارد تأثیر فواصل عرضی و طولی موانع در نظر گرفته نشده و همچنین آرایش موانع هیچ اثری ندارد. در نمودارهای فیتزها نیز از عدد بدون بعد رینولدز جهت محاسبه عدد استروهال استفاده نشده است. دامنه تغییرات عدد استروهال اندازه‌گیری شده در این تحقیق بین ۰/۱۱ تا ۰/۳۷۷ می باشد.

(الف)

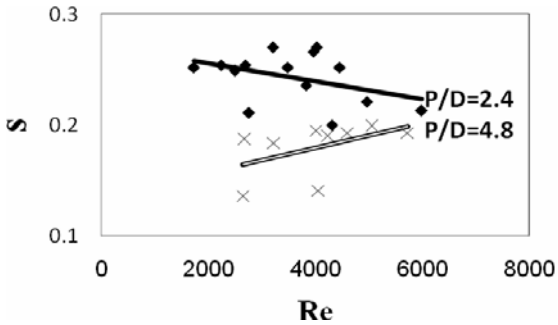


(ب)

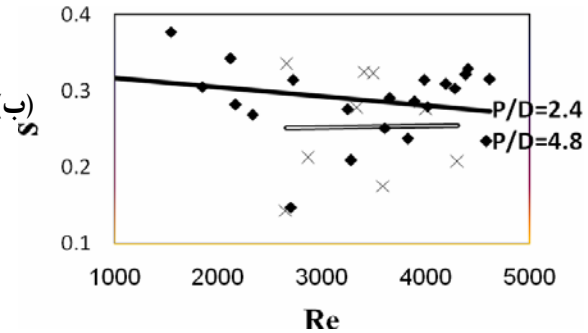


شکل ۹ – رابطه بین عدد استروهال و عدد رینولدز موانع، (الف): P/D=T/D=2.4, N=12 **و (ب):** P/D=5, T/D=2.5, N=23

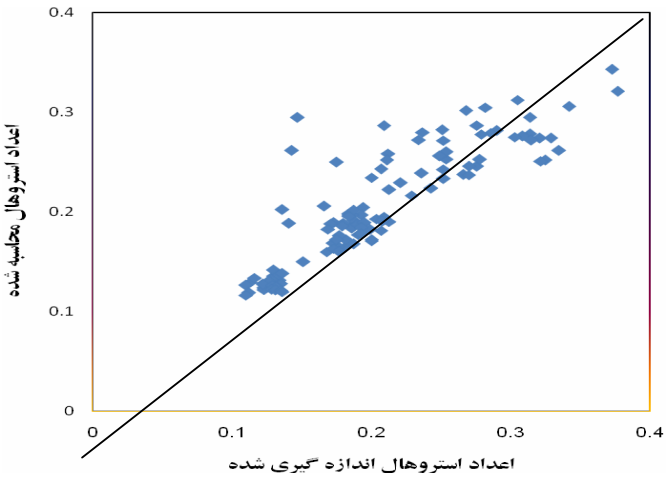
(الف)



(ب)



شکل ۱۰ – رابطه بین عدد استروهال و P/D**، (الف):** T/D=4.8 , N=6 **و آرایش زیگزاگی و (ب):** T/D=2.4 , N=12 **و آرایش موازی**



شکل ۱۱- مقایسه بین اعداد استروهال اندازه گیری شده با اعداد محاسبه شده از روابط ۹ و ۱۰

با استفاده از روابط عزیزی و قمشی (روابط ۴ و ۵) نیز عدد استروهال محاسبه گردید و با اعداد استروهال اندازه گیری شده مقایسه صورت گرفت. اعداد استروهال محاسبه شده تقریباً در چهار مقدار ۰/۲۵، ۰/۱۸، ۰/۱۴ و ۰/۱ قرار گرفت و ارتباط نزدیکی با اعداد اندازه گیری شده ندارند. دلیل این اتفاق، محدودیت نوع موجها در آزمایش‌های مربوطه و در نظر نگرفتن نوع موج در محاسبه عدد استروهال است. زیرا با تغییر در نوع موج، عدد استروهال نیز تغییر می‌کند. در واقع تغییرات عمق که همراه با تغییرات سرعت است منجر به شکل‌گیری امواج از نوعهای مختلف می‌گردد که تغییرات سرعت نیز باعث تغییرات عدد رینولدز می‌گردد. به همین منظور عدد بدون بعد رینولدز می‌تواند از پارامترهای تأثیر گذار بر روی عدد استروهال باشد. آزمایش‌های عزیزی و قمشی با موانع به قطر و دبی ثابت صورت گرفته و در آزمایش‌های چهار نوع موج را مشاهده نموده‌اند.

جهت پیدا کردن رابطه‌ای بین عدد استروهال و متغیرهای تأثیرگذار، از روش آنالیز ابعادی استفاده گردید و روابط زیر در نظر گرفته شد.

$$\phi_1(S,U,T,P,N,D,\upsilon,Pa)=0 \qquad (۷)$$

$$S=\phi_2\left(\mathrm{Re},\frac{T}{D},\frac{P}{D},N,Pa\right) \qquad (۸)$$

در روابط بالا، Pa آرایش قرارگیری موانع استوانه‌ای بوده و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده است.

برای اطمینان از وجود رابطه بین عدد استروهال و پارامترهای بی بعد موثر، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به هر پارامترِ بی بعد و عدد استروهال بصورت مجزا، در شرایطی که پارامترهای دیگر در مقادیر ثابت، بدون تغییر هستند و یا بازه تغییرات کوچکی دارند، بررسی گردید که برای نمونه اشکال ۹ و ۱۰ آورده شده است.

در اشکال ۹- الف و ۹ - ب رابطه بین عدد بدون بعد رینولدز و عدد استروهال، در حالی که سایر پارامترهای بدون بعد موثر ثابت می باشد، مورد بررسی قرار گرفته در حالی که در هر دو شکل آرایش موانع موازی است. با توجه به نمودارها، تقریباً در هر دو نمودار با افزایش در عدد رینولدز، تا حدودی عدد استروهال کاهش می‌یابد. در سایر حالات نیز تقریباً چنین رابطه ای برقرار می باشد.

رابطه بین پارامتر بدون بعد P/D و عدد استروهال، در اشکال ۱۰- الف و ۱۰-ب در حالی که سایر پارامترهای بدون بعد موثر ثابت می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودارها، تقریباً در هر دو نمودار با افزایش P/D، عدد استروهال کاهش می‌یابد. تقریباً در سایر حالات نیز چنین رابطه‌ای بین این دو پارامتر برقرار است. وجود رابطه بین پارامتر بدون بعد T/D و عدد استروهال نیز مورد بررسی قرار گرفت و تقریبا با افزایش در T/D عدد استروهال کاهش می یابد.

با استفاده از نرم افزار SPSS و انجام تجزیه و تحلیلهای آماری روابط ۹ و ۱۰ جهت محاسبه عدد استروهال ارائه گردید.

$$S=\frac{7.520(\frac{D}{T})^{0.485}(\frac{D}{P})^{0.177}}{\mathrm{Re}^{0.151}N^{0.590}} \qquad (۹)$$

$$S=\frac{7.213(\frac{D}{T})^{0.681}(\frac{D}{P})^{0.328}}{\mathrm{Re}^{0.161}N^{0.404}} \qquad (۱۰)$$

روابط ۹ و ۱۰ به ترتیب مربوط به آرایشهای موازی و زیگزاگی موانع می‌باشد. در شکل۱۰اعداد استروهال محاسبه شده

با روابط ۹ و ۱۰ با اعداد استروهال اندازه گیری شده مقایسه شده و همانگونه که مشخص است، رابطه نسبتاً خوبی بین این اعداد برقرار می باشد.

نتیجه گیری

این مطالعه با هدف محاسبه عدد استروهال جریان آب عبوری از مجموعه موانع استوانه‌ای انجام شده است. عبور جریان از مجموعه موانع مانند پایه‌های پل، پایه‌های اسکله‌های رودخانه‌ای و درختان در سیلاب دشت رودخانه ها، سبب تشکیل ورتکس با فرکانس خاصی می شود که این فرکانس با استفاده از عدد بدون بعد استروهال قابل محاسبه است. برای رسیدن به اهداف مورد نظر، آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب انجام و نتایج زیر حاصل گردید:

- عدد رینولدز پارامتر بدون بعدی است که تأثیر مهمی در مقدار عدد استروهال دارد.
- P/D (فواصل طولی موانع به قطر موانع)، T/D (فواصل عرضی موانع به قطر موانع) و N (تعداد استوانه‌ها در یک ردیف) از پارامترهای بدون بعد تأثیر گذار بر روی عدد استروهال بوده که تأثیر آنها در روابط (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.
- در آزمایش‌های تحقیق حاضر، ده نوع موج عرضی در فلوم مشاهده گردیده شد در حالی‌که در تحقیق‌های گذشته تنها چهار نوع موج گزارش شده است.
- با آنالیز ابعادی و بررسی پارامترهای بدون بعد موثر، روابط جدیدی با استفاده از تجزیه و تحلیلهای آماری، جهت محاسبه عدد استروهال در مجاری روباز با مجموعه موانع استوانه ای ارائه شده است.

تشکر و سپاسگزاری

بدینوسیله از گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز بدلیل ارائه تسهیلات و امکانات آزمایشگاهی این تحقیق تشکر و قدردانی می نماید.

منابع

1. Azizi, R. and M. Ghomeshi. 2010. Computing Strouhal Number in transverse wave generation by vortex shedding in open channels. Proceedings of IAHR-APD Congress, The University of Auckland, New Zealand.
2. Blevins, R. D. 1977. Flow-induced vibrations. Van Nostrand Reinhold, New York.
3. Dean G. D. and R. A. Dalrymple. 1984. Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific, London.
4. Fitz-hugh, J. S. 1973. Flow induced vibration in heat exchangers. Rep. No.RS57. AERE-P7238. Oxford Univ. Press, New York.
5. Ghomeshi, M. Mortazavi-Dorcheh, S. A. and R. Falconer. 2007. Wave formation by vortex shedding in open channel. Journal of Applied Sciences, 7 (24): 3927-3934.
6. Jafari, A. Ghomeshi, M. Bina, M. and S. M. Kashefipour. 2010a. Comparing of ten modes of oscillation occurring across the open channels. Proceedings of IAHR-APD Congress, The University of Auckland, New Zealand.
7. Jafari, A. Ghomeshi, M. Bina, M. and S. M. Kashefipour. 2010b. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels. Journal of Food, Agriculture and Environment, 8(2): 949-955.
8. Lienhard, J. H. 1966. Synpsis of lift, drag and vortex frequency data for rigid circular cylinders. Washington State University, College of Engineering, Research Division, Bulletin 300.
9. Prasanth, T. K. and S. Mittal. 2009. Vortex-induced vibration of two circular cylinders at low Reynolds Number. Journal of Fluids and Structures, 25(4): 731-741.
10. White, F. M. 1979. Fluid mechanics. McGraw-Hill, New York.
11. Zima, L. and N. L. Ackermann. 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE., 128(6): 596-603.