



Relationship between Frequency of Transverse Waves and Characteristics of Flow and Obstacles in Open Channels

R. Azizi^{1*} and M. Ghomeshi²

Abstract

When the fluid flow passes through a cluster of rigid vertical cylinders, the overlap of shear layers and vortex resulted from the separation of the streamlines around each rod leads in the surface waves. These waves are categorized in three groups of standing oscillatory, transverse waves, and linear waves. The present study focused on this phenomenon based on laboratory tests in a rectangular flume. Wooden rods 0.35 meter in height and 0.025 meter in diameter are placed in the flow path screwed on the bottom of the laboratory flume. By changing the hydraulic conditions of the flow, four types of surface waves are observed across the laboratory flume. In the condition of wave resonance, there is a direct relationship between the wavelength and the width of laboratory flume. The current study compares the frequency of the waves for the in-line and staggered arrangements of rods. Moreover by using dimensional analysis and SPSS software, two equations are proposed for determination of frequency of free surface transverse wave generated by vortex shedding in open channels.

Keywords: Vortex, Transverse wave, Wavelength, Frequency, Open Channels.

رابطه فرکانس امواج عمود بر جریان در مجاری روباز با مشخصات جریان و موانع

رضا عزیزی^{۱*} و مهدی قمیچی^۲

چکیده

بر اثر جریان سیالات پیرامون مجموعه ای از موانع استوانه ای که در مسیر جریان قرار گرفته‌اند، در نتیجه هم پوشانی لایه‌های برشی و ورتکس ناشی از جدایی خطوط جریان، امواج عمود بر جریان تشکیل می‌شود. امواج عمود بر جریان از نوع امواج نوسانی ایستا، عرضی و خطی هستند. در این تحقیق پدیده امواج عمود بر جریان در یک فلوم آزمایشگاهی بررسی شده است. موانع مسیر جریان، استوانه‌های چوبی به قطر ۰/۰۲۵ متر و ارتفاع ۰/۳۵ متر هستند که در کف فلوم آزمایشگاهی نصب شده‌اند. با تغییر دادن شرایط هیدرولیکی جریان چهار نوع موج با خصوصیات متفاوت در فلوم آزمایشگاهی تشکیل می‌شود. در حالت تشدید امواج، رابطه مستقیمی بین طول موج امواج و عرض فلوم آزمایشگاهی وجود دارد. در این تحقیق فرکانس امواج عمود بر جریان در آرایشهای ردیفی و زیگزاگی موانع مقایسه شده است. همچنین با استفاده از آنالیز ابعادی و تجزیه و تحلیل آماری (نرم افزار SPSS)، دو رابطه برای تعیین فرکانس امواج حاصل از پدیده ارتعاش ناشی از ورتکس در مجاری روباز ارائه شده است.

کلمات کلیدی: ورتکس، موج عمود بر جریان، طول موج، فرکانس، مجاری روباز.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۷ آذر ۱۳۸۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸ خرداد ۱۳۸۹

1- Ph. D. Candidate, Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. E-mail: rezaazizi_utacir@yahoo.com

2- Professor, Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. E-mail: m.ghomeshi@yahoo.com

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

بیشتر یافته‌ها و تحقیقات در مورد گرداب‌های حاصل از عبور سیالات از پیرامون موانع موجود در مسیر جریان به گازها مربوط می‌شود، عمده تحقیقات در این زمینه توسط افرادی چون (Fitz-Hugh (1973)، Blevins (1985)، Zukauskas et al. (1988) و... صورت گرفته است. در مقابل تحقیقاتی که به تشکیل گرداب و پدیده‌های مرتبط با آن در محیط آب پرداخته باشند بسیار کم است. اولین یافته‌ها به تحقیق Crasse (1939) مربوط می‌شود. Schuster (1967) و Clays and Tison (1968) و نوسانات ناشی از پایه‌های پل را بررسی کرده‌اند. همچنین Falvey (1980) تولید موج توسط پایه‌های پل را در یک کانال دوزنقه‌ای بررسی کرده است. در تحقیق دیگری (Zima and Ackermann (2002) فرمولی برای شبیه‌سازی مقادیر ماکزیمم دامنه امواج به صورت بی بعد (A/h) ارائه کرده‌اند. در تحقیق جدیدی (Ghomeshi et al. (2007) تشکیل امواج عمود بر جریان در مجاری باز را در یک فلوم آزمایشگاهی بررسی و روابطی برای محاسبه دامنه و فرکانس امواج پیشنهاد کرده‌اند.

۲- عدد استروهال

برای انجام محاسبات مربوط به فرکانس امواج، عدد بی‌بعد استروهال^{۱۲} به صورت روابط زیر تعریف می‌شود (Nuadascher and Rockwell, 1979).

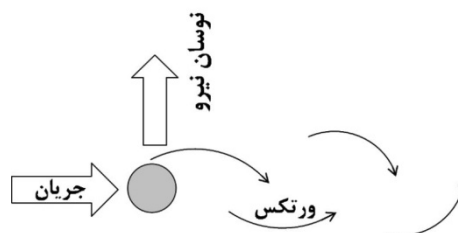
$$S = \frac{f_s D}{U} \quad (۱)$$

$$f_s = \frac{S.U}{D} \quad (۲)$$

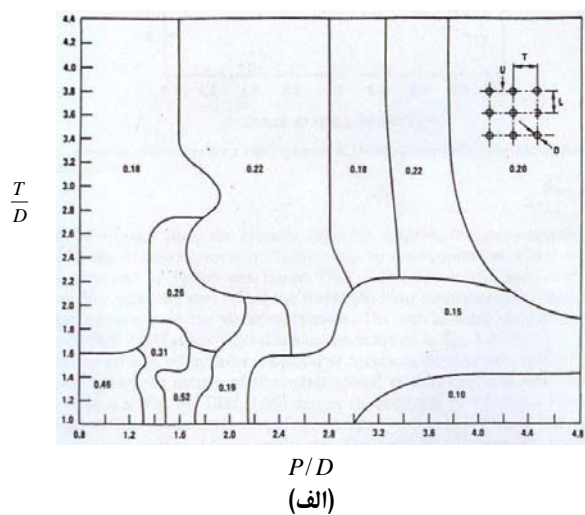
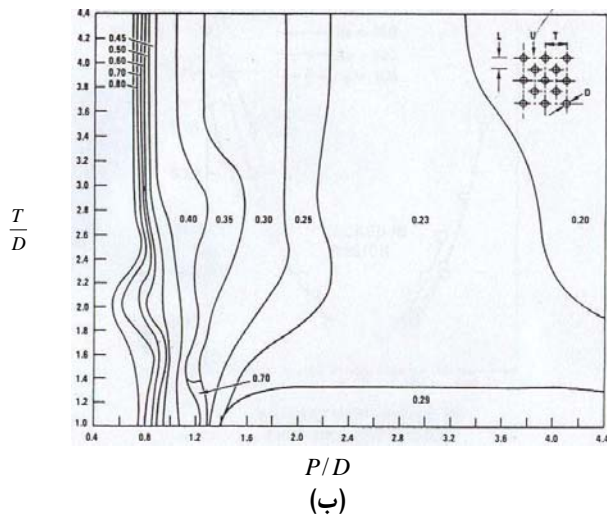
در روابط (۱) و (۲)، S = عدد استروهال، f_s = فرکانس، D = قطر موانع استوانه‌ای و U سرعت جریان آزاد است. برای گازها در جریانهای با عدد ماخ کوچک^{۱۳} Lienhard (1966) نموداری برای تعیین عدد استروهال (S) با استفاده از عدد رینولدز (Re) ارائه کرده است که با استفاده از آن، برای محدوده بزرگی از عدد رینولدز مقدار عدد استروهال تقریباً 0.2 خواهد بود. برای حالتی که مجموعه‌ای از موانع در آرایشهای ردیفی^{۱۴} و زیگزگی^{۱۵} به صورت عمودی در مقابل جریان گاز قرار می‌گیرند، (Fitz-Hugh (1973) دو نمودار برای تعیین عدد استروهال ارائه کرده است (شکل ۲). در شکل ۲ متغیرهای T/D و P/D به ترتیب نسبت فاصله‌ی بین موانع متوالی در هر ردیف به قطر موانع و نسبت فاصله‌ی بین ردیف‌های موانع به قطر موانع را بیان می‌کنند. هر دو پارامتر مذکور بدون بعد می‌باشند. محل تلاقی دو پارامتر بدون بعد در هر یک از نواحی، مقدار تقریبی عدد استروهال را مشخص می‌نماید.

در جریان مجاری روباز تغییر در اندازه سرعت یا عمق جریان نسبت به زمان یا مکان را موج می‌نامند (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۷). به عبارت دیگر جریان‌های غیر ماندگار در مجاری روباز که تحت تاثیر نیروی ثقل قرار می‌گیرند، جریان‌هایی تحت عنوان امواج آب^۱ را ایجاد می‌کنند. امواج بلند^۲، امواج جزر و مد^۳، امواج ناگهانی^۴ (خیزاب) در نتیجه عملکرد سازه‌های مصنوعی موجود در مسیر جریان، شکست سد^۵ و موج سیل^۶ از جمله مثال‌هایی هستند که در جریان‌های غیرماندگار با سطح آزاد ایجاد می‌شوند. در تمام موارد فوق، امتداد انتشار امواج به موازات جهت جریان سیال می‌باشد. در این تحقیق، امواج سطحی عمود بر جریان مورد بررسی قرار گرفته است که مهمترین تفاوت آن با موارد فوق امتداد انتشار امواج می‌باشد. امواج عمود بر جریان در امتداد عرض آبراهه (عمود بر جهت جریان) منتشر می‌شوند. مکانیسم تشکیل امواج عمود بر جریان به صورت زیر می‌باشد.

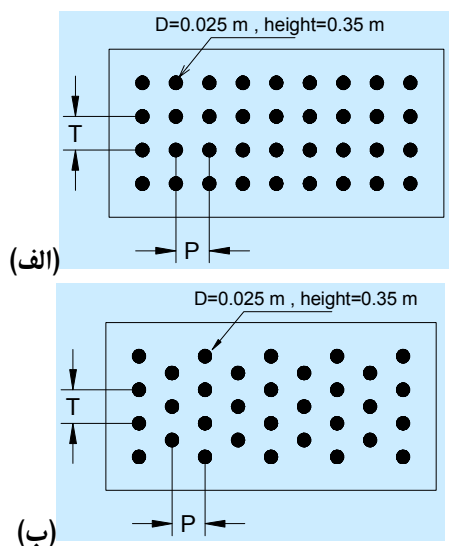
در جریان‌های آزاد و تحت فشار سیالات، هنگامی که جسم جامدی در مسیر جریان سیال (اعم از گازها و مایعات) قرار می‌گیرد، با رسیدن ذره سیال به لبه جلویی جسم جامد، سرعت صفر می‌شود و فشار ذره از فشار اولیه سیال تا حد فشار دینامیک در نقطه سکون^۷ افزایش می‌یابد. فشار بالای سیال در نزدیکی مرز جسم جامد باعث تشکیل لایه مرزی در طرفین جسم جامد می‌شود. با رشد لایه مرزی و پس از طی مسافتی در روی مرز جسم جامد، در اثر گرادیان فشار، پدیده جدایی خطوط جریان^۸ رخ می‌دهد. در پایین دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله^۹ و ورتکس^{۱۰} بوجود می‌آید (انتظاری، ۱۳۸۱؛ Nuadascher and Rockwell, 1979). در شکل ۱ نمای شماتیک تشکیل ورتکس در یک سمت مانع استوانه‌ای نشان داده شده است. در نتیجه همپوشانی ورتکس ناشی از موانع، امواج عمود بر جریان در سطح جریان و در امتداد عرض آبراهه تشکیل می‌شوند. امواج عمود بر جریان، امواج نوسانی (تناوبی) ایستا^{۱۱} و عرضی هستند و با توجه به دامنه کم آنها، خطی فرض می‌شوند.



شکل ۱- نمای شماتیک تشکیل ورتکس در یک سمت مانع استوانه‌ای



شکل ۲- تعیین عدد استروهال در جریان گازها: (الف) آرایش ردیفی موانع و (ب) آرایش زیگزاگی موانع.

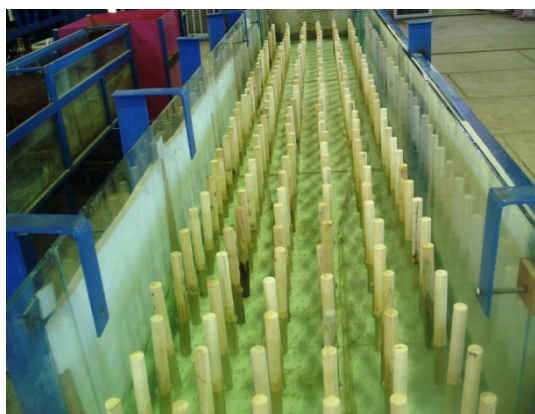


شکل ۳- (الف) آرایش ردیفی موانع استوانه ای و (ب) آرایش زیگزاگی موانع استوانه ای

در جدول ۱ مشخصات کلی آزمایشهای انجام شده در تحقیق حاضر ارائه شده است. در ستون (۱) از جدول ۱ شماره آزمایشها مشخص شده است. در ستون (۲) فاصله بین استوانه‌های متوالی در هر ردیف (T)، در ستون (۳) فاصله بین ردیف‌های موانع (P)، در ستون (۴) آرایش موانع، در ستون (۵) تراکم موانع (در آرایش ردیفی تعداد موانع در هر ردیف و در آرایش زیگزاگی میانگین تعداد موانع در دو ردیف متوالی، معرف تراکم موانع می‌باشد)، در ستونهای (۶) و (۷) بترتیب نسبت‌های بدون بعد P/D و T/D مشخص شده است. D قطر موانع استوانه‌ای می‌باشد. در ستون (۸) حداکثر دامنه امواج در هر آزمایش بصورت درصدی از عمق متوسط جریان با نسبت بدون بعد A/h مشخص شده است.

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶ متر، عرض 0.72 متر، ارتفاع 0.6 متر و شیب ثابت 0.005 مورد استفاده قرار گرفت. بده جریان نیز در طول آزمایشها ثابت و برابر 0.1 متر مکعب بر ثانیه تنظیم شد. با توجه به ظرفیت فلوم آزمایشگاهی، به ازای بده 0.1 متر مکعب بر ثانیه، شرایط مورد نیاز در تمام آزمایشها را تامین می‌شد. بده به وسیله یک جریان سنج^{۱۶} که در سیستم ورودی فلوم نصب شده، اندازه گیری و تنظیم می‌گردید. جریان پس از عبور از یک مخزن آرام کننده وارد فلوم آزمایشگاهی می‌شد. کنترل عمق (h) و (سرعت) توسط سرریز کشویی^{۱۷} که در انتهای فلوم نصب شده، صورت می‌گرفت. در هر آزمایش ارتفاع سرریز کشویی از یک مقدار حداکثر (متناسب با عمق جریانی که امواج عمود بر جریان شکل می‌گیرند) تا ارتفاع صفر با گام‌های 0.005 متر تغییر می‌کرد. به منظور تثبیت موانع استوانه‌ای در مسیر جریان، از صفحات پلکسی گلاس استفاده شد. به این ترتیب که تمام سطح این صفحات با فواصل طولی و عرضی 0.3 متر، شبکه بندی و سپس رزوه شد تا بتوان موانع استوانه‌ای (به قطر 0.025 متر و ارتفاع 0.35 متر) را روی آنها پیچ نمود. این صفحات در کف فلوم آزمایشگاهی قرار می‌گیرند، در نتیجه می‌توان موانع استوانه‌ای را با فواصل طولی (P) و عرضی (T) مختلف در دو آرایش ردیفی و زیگزاگی روی این صفحات نصب نمود. آرایش‌های ردیفی و زیگزاگی موانع و فواصل طولی و عرضی آنها در شکل ۳ و دو نمونه از قرارگیری موانع در فلوم آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است. در تحقیق حاضر ۲۲ آزمایش با فواصل طولی و عرضی مختلف موانع در دو آرایش ردیفی و زیگزاگی انجام شده است.



شکل ۴- دو نمونه از نحوه نصب و قرار گیری موانع در فلوم آزمایشگاهی

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایشهای انجام شده در تحقیق

(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
شماره آزمایش	T (m)	P (m)	آرایش موانع	N	T/D	P/D	A/h (%)
۱	۰/۰۹	۰/۱۲	ردیفی	۸/۰	۳/۶	۴/۸	۳۱/۰
۲	۰/۰۹	۰/۲۴	ردیفی	۸/۰	۳/۶	۹/۶	۱۸/۰
۳	۰/۰۹	۰/۳۶	ردیفی	۸/۰	۳/۶	۱۴/۴	۱۴/۰
۴	۰/۱۸	۰/۱۲	ردیفی	۴/۰	۷/۲	۴/۸	۱۸/۰
۵	۰/۱۸	۰/۲۴	ردیفی	۴/۰	۷/۲	۹/۶	۸/۳
۶	۰/۱۸	۰/۳۶	ردیفی	۴/۰	۷/۲	۱۴/۴	۳/۰
۷	۰/۲۷	۰/۱۲	ردیفی	۳/۰	۱۰/۸	۴/۸	۷/۲
۸	۰/۲۷	۰/۲۴	ردیفی	۳/۰	۱۰/۸	۹/۶	۳/۰
۹	۰/۲۷	۰/۳۶	ردیفی	۳/۰	۱۰/۸	۱۴/۴	بدون موج
۱۰	۰/۰۶	۰/۱۲	زیگزاگی	۱۰/۵	۲/۴	۴/۸	۲۱/۰
۱۱	۰/۰۶	۰/۲۴	زیگزاگی	۱۰/۵	۲/۴	۹/۶	۲۱/۰
۱۲	۰/۰۶	۰/۳۶	زیگزاگی	۱۰/۵	۲/۴	۱۴/۴	۱۲/۰
۱۳	۰/۰۶	۰/۰۶	ردیفی	۱۱/۰	۲/۴	۲/۴	۴۳/۰
۱۴	۰/۱۲	۰/۱۲	ردیفی	۶/۰	۴/۸	۴/۸	۴۰/۰
۱۵	۰/۰۹	۰/۰۹	زیگزاگی	۷/۵	۳/۶	۳/۶	۲۸/۰
۱۶	۰/۰۹	۰/۰۶	ردیفی	۷/۰	۳/۶	۲/۴	۳۴/۰
۱۷	۰/۰۹	۰/۰۳	زیگزاگی	۷/۵	۳/۶	۱/۲	۲۰/۰
۱۸	۰/۱۲	۰/۰۶	زیگزاگی	۵/۵	۴/۸	۲/۴	۲۳/۰
۱۹	۰/۰۳	۰/۰۳	زیگزاگی	۲۲/۵	۱/۲	۱/۲	بدون موج
۲۰	۰/۰۳	۰/۰۶	ردیفی	۲۳/۰	۱/۲	۲/۴	بدون موج
۲۱	۰/۰۳	۰/۰۹	زیگزاگی	۲۲/۵	۱/۲	۳/۶	بدون موج
۲۲	۰/۰۳	۰/۱۲	ردیفی	۲۳/۰	۱/۲	۴/۸	بدون موج

می‌گرفت. در هر آزمایش برای ارتفاع مشخص سرریز کشویی پایین دست (با گام تغییرات ۰/۰۰۵ متر)، دامنه امواج (بصورت حداکثر و حداقل عمق جریان روی دیواره فلوم) در ۳ مقطع اندازه گیری می‌شد و نوع موج مشاهده شده نیز ثبت می‌گردید.

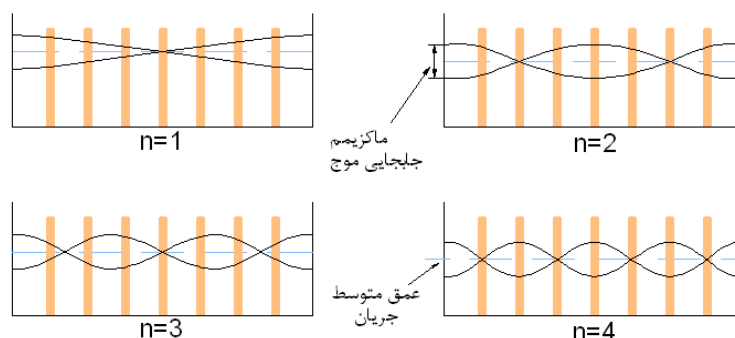
A دامنه امواج و h عمق متوسط جریان می‌باشد. در هر آزمایش به طور متوسط از ۲۵۰ عدد استوانه چوبی به عنوان موانع مسیر جریان در فلوم آزمایشگاهی استفاده شده است. در هر آزمایش با توجه به طول ناحیه مانع گذاری، موانع در قسمت میانی فلوم نصب می‌شدند و در ۳ مقطع در طول ناحیه مانع گذاری شده، اندازه‌گیری‌ها انجام

۴- مشاهدات

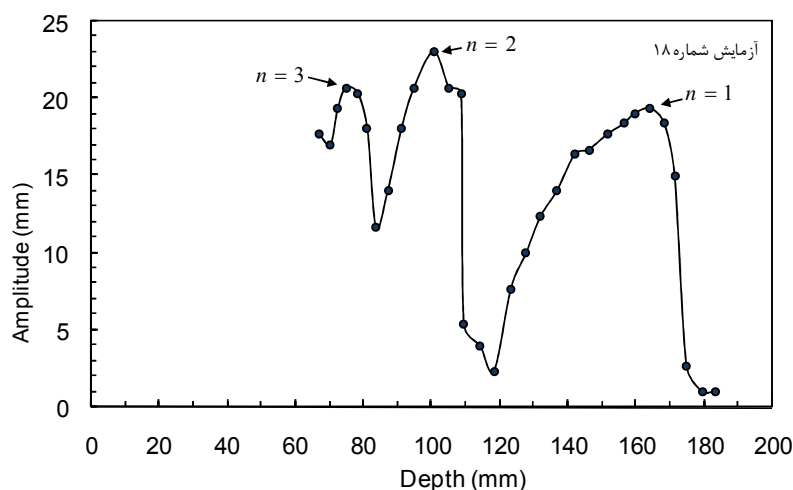
با توجه به جدول ۱ در آزمایش شماره ۹ بدلیل تراکم کم موانع و عدم همپوشانی ورتکس ناشی از موانع و در آزمایشهای شماره ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ بدلیل تراکم زیاد موانع و افت زیاد انرژی موجی تشکیل نشد. همچنین بیشترین دامنه موج مشاهده شده در آزمایشها، ۴۳ درصد عمق متوسط جریان می باشد که در آزمایش شماره ۱۳ تشکیل شده است (شکل ۷). در شکل ۷ دامنه بدون بعد امواج، A/h ، در مقابل عمق متوسط جریان رسم شده است. حداکثر دامنه موج مشاهده شده در سایر آزمایشها، به صورت درصدی از عمق متوسط جریان، در ستون (۸) از جدول ۱ مشخص شده است. در حالت حداکثر دامنه امواج (تشدید امواج)، طول موج امواج (λ) رابطه مستقیمی با عرض فلوم آزمایشگاهی (b) دارد:

$$\begin{aligned} \lambda_{n=1} &= 2b & \lambda_{n=2} &= 1b \\ \lambda_{n=3} &= \frac{2}{3}b & \lambda_{n=4} &= \frac{1}{2}b \end{aligned} \quad (3)$$

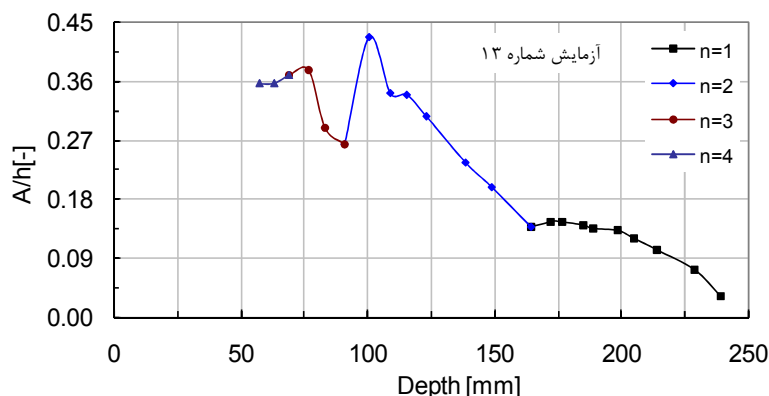
در جریان مجاری روباز چهار نوع موج عمود بر جهت جریان تشخیص داده می شود. این چهار نوع موج با حرف n و شماره های ۱ تا ۴ نامگذاری می شوند. در شکل (۵) این چهار نوع موج مشخص شده اند. در فلوم آزمایشگاهی در حالتی که موانع مستغرق هستند هیچ موجی تشکیل نمی شود با کاهش تدریجی عمق جریان (با کاهش ارتفاع سرریز کشویی) موج $n=1$ با دامنه کم شروع به نوسان می کند، با کاهش بیشتر عمق جریان دامنه موج $n=1$ بیشتر می شود تا اینکه به یک مقدار حداکثر، در حالت تشدید، می رسد. با کاهش مجدد عمق جریان، دامنه موج به تدریج کاهش می یابد، تا اینکه موج $n=1$ به طور کامل محو می شود. با کاهش بیشتر عمق جریان به تدریج موج $n=2$ تشکیل می شود، این موج هم پس از رسیدن به یک دامنه نوسان حداکثر، در کاهش های بعدی عمق جریان از بین می رود. موج های $n=3$ و $n=4$ نیز در صورت وجود، با همین روند شکل می گیرند (شکل ۶).



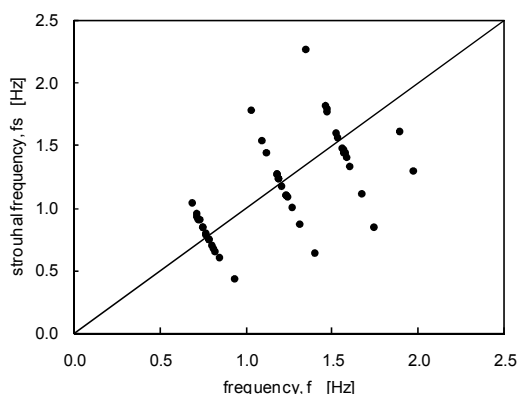
شکل ۵- انواع امواج عمود بر جریان در فلوم آزمایشگاهی.



شکل ۶- تغییرات دامنه امواج در مقابل تغییرات عمق جریان (رابطه بین دامنه امواج، نوع امواج و عمق جریان).



شکل ۷- دامنه بدون بعد امواج در مقابل عمق متوسط جریان.



شکل ۸- مقایسه فرکانس محاسبه شده با تئوری امواج خطی (f) و مقادیر بدست آمده از رابطه (۲) بر اساس استفاده از نمودارهای Lienhard و Fitz-Hugh

برای اطمینان از وجود رابطه بین عدد استروهل و پارامترهای بی بعد مؤثر، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به هر پارامتر بی بعد و عدد استروهل به صورت مجزا بررسی می‌شود (شکل‌های ۹-۱۲). بررسی وجود رابطه بین هر یک از پارامترهای بدون بعد و عدد استروهل در شرایطی انجام می‌شود که دو پارامتر دیگر در مقادیر ثابت، بدون تغییر هستند و یا بازه تغییرات کوچکی دارند.

با توجه به نمودارهای بالا، با افزایش T/D ، عدد استروهل (S) کاهش می‌یابد، روند مذکور در سایر محدوده‌های N و سایر مقادیر P/D نیز وجود دارد که در اینجا برای کاهش تعداد شکل‌ها از ارائه آنها خودداری شده است.

با توجه به نمودارهای بالا با افزایش N ، عدد استروهل (S) کاهش می‌یابد. روند مشاهده شده در شکل ۱۰ به ازای سایر مقادیر T/D و P/D نیز وجود دارد. در بررسی رابطه S با P/D دو روند مشاهده شده است، به ازای $P/D < 5$ ، با افزایش P/D عدد استروهل کاهش و به ازای مقادیر $P/D > 5$ ، با افزایش P/D

۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

جهت تعیین فرکانس امواج عمود بر جریان، از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. Dean and Dalrymple (1984)، براساس تئوری امواج خطی^{۱۸}، رابطه (۴) را برای تعیین فرکانس امواج عمود بر جریان ارائه کرده اند. همچنین براساس رابطه (۲) نیز می‌توان فرکانس امواج عمود بر جریان را محاسبه نمود.

$$f = \left(\frac{gn}{4\pi b} \tanh \frac{n\pi h}{b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، f = فرکانس امواج، g = شتاب گرانش، n = نوع امواج ($n=1,2,3,4$)، h = عمق متوسط جریان و b عرض فلوم آزمایشگاهی می‌باشد. به دلیل نبود معادلات و نمودارهای مناسب جهت تعیین مقادیر عدد استروهل برای جریان مجاری روباز (عمده روابط و نمودارهای ارائه شده برای سیالات گازی می‌باشد، مانند نمودارهای Lienhard و Fitz-Hugh). چنانکه مقادیر عدد استروهل با استفاده از شکل ۲ تعیین شوند و فرکانس امواج با رابطه (۲) محاسبه و مقادیر حاصل با نتایج بدست آمده از رابطه (۴) مقایسه شوند، برازش خوبی حاصل نمی‌شود، (شکل ۸). بنابراین به منظور محاسبه فرکانس امواج عمود بر جریان، ابتدا باید مقادیر مناسب عدد استروهل تعیین شود.

در ادامه به منظور تعیین روابطی جهت محاسبه عدد استروهل، تابع زیر بین عدد استروهل و مشخصات موانع در نظر گرفته می‌شود:

$$\phi(S, T, P, N, D) = 0 \quad (5)$$

$$S = \phi\left(\frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N\right) \quad (6)$$

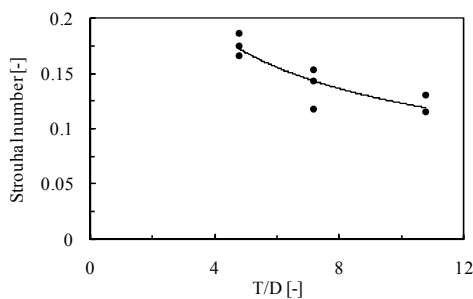
در دو رابطه بالا، S = عدد استروهل، T = فاصله بین موانع متوالی در هر ردیف، P = فاصله بین ردیفهای موانع، N تراکم موانع (میانگین تعداد موانع در دو ردیف متوالی) و D قطر موانع استوانه ای می‌باشد.

عدد استروهال نیز افزایش می‌یابد، رابطه عدد استروهال با P/D در دو محدوده این پارامتر در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

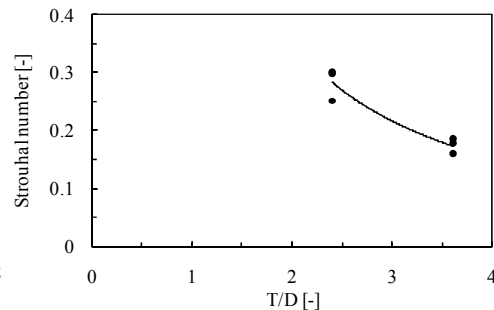
$$S = \frac{k}{(T/D) \cdot \sqrt[3]{(P/D) \cdot N}} \quad , \quad \frac{P}{D} < 5 \quad (7)$$

در رابطه (۷)، k ثابت معادله است که مقدار آن برای آرایش ردیفی موانع ۲ و برای آرایش زیگزاگی موانع ۲/۴۴ (۲۲ درصد بیشتر) خواهد بود. با استفاده از رابطه (۷) مقادیر جدید S تعیین و سپس با استفاده از رابطه (۲) مقادیر f_s محاسبه می‌شود. مقادیر جدید f_s با مقادیر f (فرکانس محاسبه شده با تئوری امواج خطی) در شکل ۱۳ مقایسه شده است. شکل (۱۳-الف) بخشی از شکل ۷ می‌باشد که با توجه به داده‌های محدوده $P/D < 5$ مجزا شده است.

با توجه به وجود تغییرات در رابطه S با P/D ، در ادامه، محاسبات برای دو محدوده P/D به صورت جداگانه انجام می‌شود. عدد استروهال (S) در آرایش زیگزاگی موانع همواره ۲۲ درصد بیشتر از S در آرایش ردیفی موانع است (Ghomeshi et al., 2007). بنابراین محاسبات برای آرایش ردیفی موانع انجام می‌شود و نتایج برای آرایش زیگزاگی موانع اصلاح می‌گردد. با استفاده از نرم افزار SPSS رابطه S و پارامترهای مؤثر (رابطه ۶) برای محدوده $P/D < 5$ به صورت معادله (۷) به دست می‌آید:

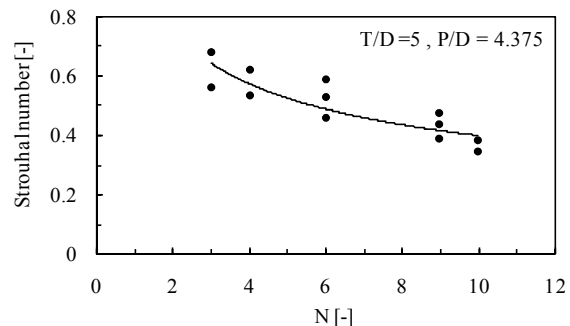
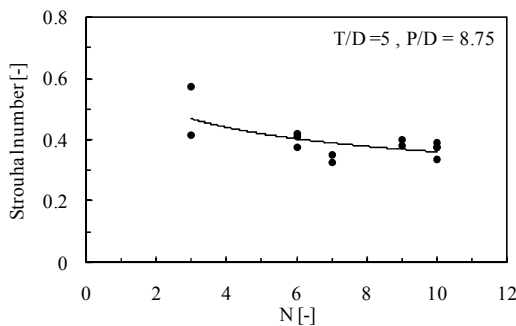


$$3 \leq N \leq 6, \quad P/D = 4.8$$

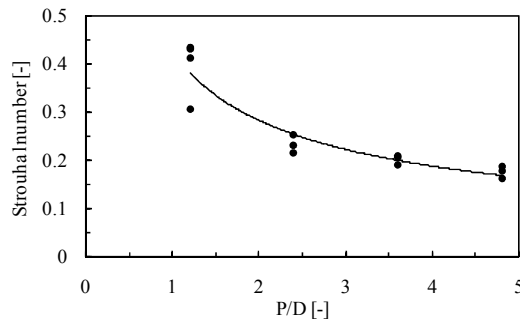


$$8 \leq N \leq 10.5, \quad P/D = 4.8$$

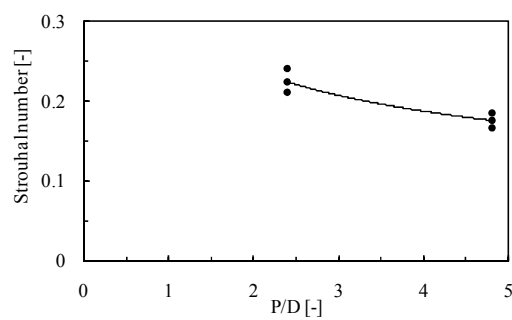
شکل ۹- رابطه بین عدد استروهال و نسبت T/D به ازای محدوده معین N و مقدار ثابت P/D .



شکل ۱۰- رابطه بین عدد استروهال و N به ازای مقادیر ثابت T/D و P/D .

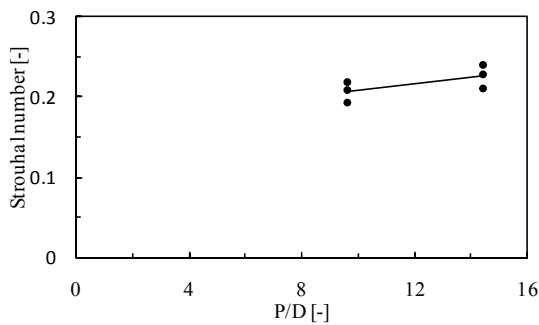


$$7 \leq N \leq 8, \quad T/D = 3.6$$

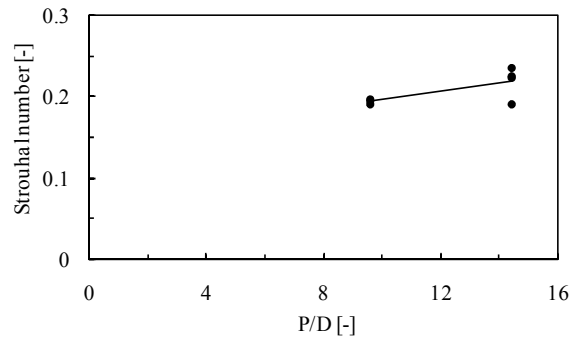


$$5.5 \leq N \leq 6, \quad T/D = 4.8$$

شکل ۱۱- رابطه بین عدد استروهال و P/D در محدوده $P/D < 5$.



$$7 \leq N \leq 8, \quad T/D = 3.6$$



$$10.5 \leq N \leq 11, \quad T/D = 2.4$$

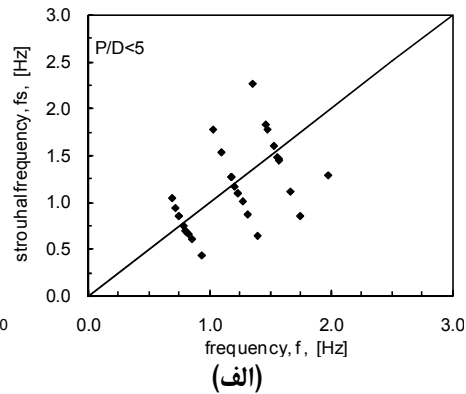
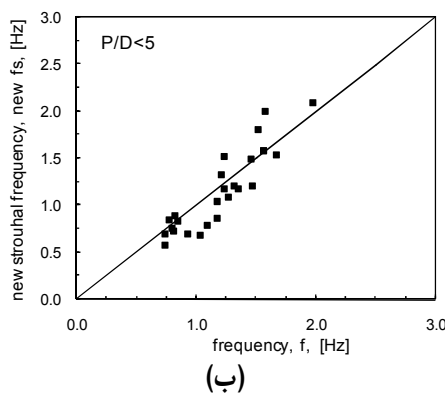
شکل ۱۲- رابطه بین عدد استروهاال و P/D در محدوده $P/D > 5$.

برای آرایش زیگزاگی موانع 0.52 خواهد بود. پس از محاسبه مقادیر جدید f_s با رابطه (۲)، در شکل ۱۴ نتایج حاصل با مقادیر f مقایسه شده است.

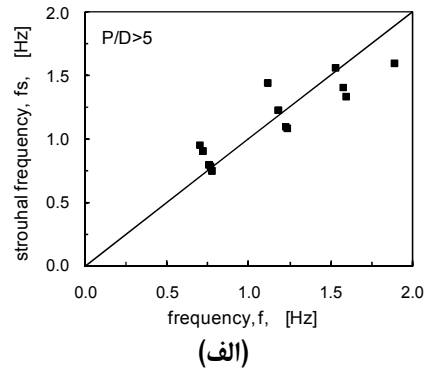
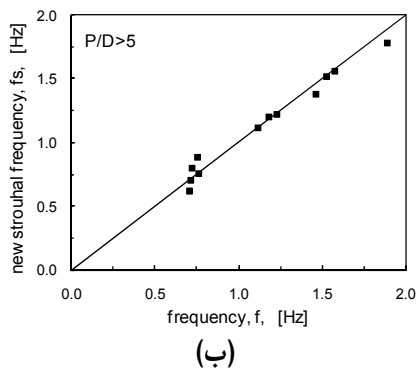
بنابراین در شکل (۱۳-الف) نیز فرکانس با استفاده از مقدار ثابت عدد استروهاال محاسبه شده و در نتیجه آن برازش خوبی حاصل نشده است.

$$S = c \cdot \sqrt[3]{\frac{(P/D)}{(T/D)^2 \cdot N}} \quad , \quad P/D > 5 \quad (۸)$$

برای محدوده $P/D > 5$ ، رابطه (۸) برای محاسبه عدد استروهاال حاصل شده است. ثابت معادله (c) برای آرایش ردیفی موانع 0.43 و



شکل ۱۳- (الف) مقایسه f با f_s (مقادیر فرکانس با استفاده از نمودارهای Lienhard و Fitz-Hugh) و (ب) مقایسه f با f_s (مقادیر فرکانس با استفاده از رابطه ۷).



شکل ۱۴- (الف) مقایسه f با f_s (مقادیر فرکانس با استفاده از نمودارهای Lienhard و Fitz-Hugh) و (ب) مقایسه f با f_s (مقادیر فرکانس با استفاده از رابطه ۸).

۶- نتیجه گیری

با جریان سیالات از پیرامون موانع مسیر جریان، پدیده جدایی خطوط جریان رخ می‌دهد و سبب تشکیل ورتکس و لایه‌های برشی می‌گردد، تشکیل ورتکس بسته به مشخصات مجرا سبب ایجاد امواج عمود بر جریان می‌گردد. در این تحقیق پدیده امواج عمود بر جریان در یک فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. از مجموعه‌ای از استوانه‌های چوبی به عنوان موانع مسیر جریان استفاده شد. در تراکم‌های کم موانع، به دلیل عدم هم پوشانی ورتکس ناشی از موانع و در تراکم‌های زیاد به دلیل افت زیاد انرژی، موجی تشکیل نشد. حداکثر دامنه موج مشاهده شده در طول آزمایشها ۴۳ درصد عمق متوسط جریان بود. در این تحقیق ضرورت تعیین مقادیر دقیق عدد بی بعد استروهل، جهت محاسبه فرکانس امواج عمود بر جریان مشخص گردید و با استفاده از آنالیز ابعادی و با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی، رابطه عدد استروهل با مشخصات موانع تعیین شد و با استفاده از نرم افزار SPSS دو رابطه برای تعیین عدد استروهل و در نتیجه محاسبه فرکانس امواج عمود بر جریان بدست آمد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Water Waves
- 2- Long Wave
- 3- Estuary Flow
- 4- Surge
- 5- Dam Break
- 6- Flood Wave
- 7- Stagnation Point
- 8- Separation
- 9- Wake
- 10- Vortex
- 11- Standing Oscillatory Waves
- 12- Strouhal Number
- 13- Subsonic Flow
- 14- In-line
- 15- Staggered
- 16- Flowmeter
- 17- Weir Gate
- 18- Small-Wave Amplitude Theory

۷- مراجع

انتظاری، ع. (۱۳۸۱)، "مکانیک سیالات"، انتشارات نوپردازان.

محمودیان شوشتری، م. (۱۳۸۷)، "اصول جریان در مجاری روباز" جلد دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران.

Blevins, R. D. (1977). Flow-induced Vibration, VNR, London, England.

Crassé. (1939) Sur un Phénomène d'Oscillation du Plan d'eau Provoqué Part 1'Écoulement Autour d'Obstacles en forme de Piles du Pont, Comptes Rendus de Séances de l'Académie de Sciences, 209. (in French).

Dean, G. D. and Dalrymple, R. A. (1984), "Water wave mechanics for engineers and scientific." World scientific, London.

Falvey, H. T. (2003), Discussion of "Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions." ASCE, 919.

Falvey, H. T. (1980), Bureau of Reclamation Experience with Flow-Induced Vibration, Practical Experiences with Flow Induced Vibrations, E. Naudascher and Rockwell, eds., Springer, New York.

Fitz-hugh, J. S. (1973) "Flow induced vibration in heat exchangers." proc. UKAEA/NPL International Symposium on vibration problems in industry, Keswick, England, paper 427, pp. 1-17.

Ghomeshi, M., Mortazavi-Dorcheh, S.A. and Falconer, R. (2007), "Wave Formation by Vortex Shedding in Open Channel." Cardiff Univ., Cardiff, UK.

Lienhard, J. H. (1966), "Synopsis of lift, drage and vortex frequency data for rigid circular cylinders." Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin 300.

Naudascher, E. and Rockwell, D. (1979) "Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations." Symposium Karlsruhe, University of Karlsruhe, Germany.

Schuster, J. C. (1967), Canal Capacity Studies, Wave Formation by Bridge Piers, Hydraulics Branch Rep., HYD-485, U.S. Bureau of Reclamation.

Zima, L. and Ackermann, N.L. (2002), "Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions." J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 6.

Zukauskas, A., Ulinskas, R. and Katinas, V. (1988), Flow Dynamics and flow-Induced Vibrations of Tube Banks, Experimental and Applied Heat Transfer Guide Books.