

# بررسی طول موج و فرکانس امواج عمود بر جریان ناشی از ورتکس موانع در مجاری روباز

عبدالعظیم قمشی<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، رضا عزیزی<sup>۳</sup>، عبدالرحیم هوشمند<sup>۴</sup>

۱- گروه علوم آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

۳- دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

۴- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

## چکیده

زمانی که مجموعه ای از موانع در مسیر حرکت سیال قرار گیرد در اثر عبور جریان از میان این موانع در لبه بالادست مانع لایه مرزی شکل می گیرد و در لبه پایین دست مانع جداسدگی جریان اتفاق می افتد. بر اثر به وجود آمدن ورتکس پشت موانع و با توجه به فرکانس طبیعی آب موجود در کانال، در جهت عمود بر جریان موجی تشکیل می گردد که به آن موج عمود بر جریان گویند. تحقیق حاضر پدیده تشکیل امواج عمود بر جریان در مجاری روباز را بررسی کرده است. در این تحقیق از یک فلوم آزمایشگاهی استفاده شده است. موانع مسیر جریان استوانه های چوبی بوده که با تراکم های مختلف و در آرایش های زیگزاگی و موازی در کف فلوم نصب می شدند. در این مطالعه در هر تراکم موانع، پس از تعیین شرایط هیدرولیکی جریان در حالت حداکثر دامنه امواج، فرکانس امواج تولید شده تحت تاثیر امواج عمود بر جریان نوع ۱ و ۲ مشخص گردید. براساس نتایج به دست آمده مشاهده گردید که با کاهش فاصله موانع در هر حالت موج، افزایش مقدار دامنه را داریم. همچنین فرکانس موج در هماهنگ دوم  $n=2$  نسبت به هماهنگ اول تقریباً یک و نیم برابر می باشد.

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

## مقدمه

حرکت سیال بوده و به همین جهت به آن موج عمود بر جریان گفته می شود.

موج مورد نظر یک موج عمود بر جریان است پس عامل تولید آن هم باید نوسانی تولید کند که موجب تشکیل و یا تشدید چنین موجی شود. موانع موجود در مسیر جریان عامل این نوسان هستند و هر مانع همانند یک منبع تولید نوسان عمل می کند.

با توجه به خصوصیات نیروهای ناشی از ورتکس و محیط حرکت سیال، برای تشکیل موج قابل مشاهده، می بایست آرایشی از موانع بوجود آورد تا در اثر جمع شدن نوسانات هر مانع امکان تشکیل یک موج (پایدار

موج عمود بر جریان یکی از پدیده هایی است که در اثر عبور سیال پیرامون اجسام و تشکیل ورتکس و در شرایطی خاص بوجود خواهد آمد.

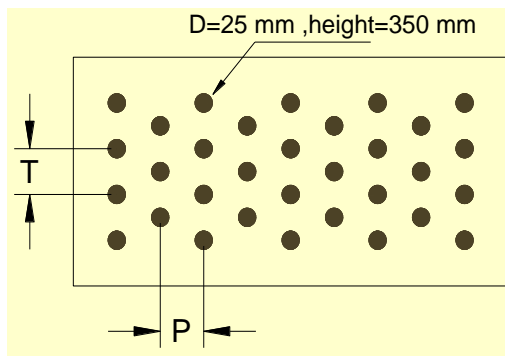
در اثر تشکیل ورتکس ناشی از هر مانع حرکت تناوبی پشت مانع بوجود می آید و چنانچه تعداد این موانع را بیشتر کنیم در اثر حرکت های تناوبی متعدد ناشی از هر مانع و بسته به شرایط فیزیکی موجود ممکن است این حرکت ها تبدیل به یک حرکت منظم دیگری شوند که به شکل یک موج با مشخصات قابل اندازه گیری ظاهر می شود، این موج عمود، بر مسیر

وجود دارد. برای بوجود آوردن شرایطی که بتوان حجم قابل توجهی از سیال به نوسان بیافتد ضروریست در بخش قابل توجهی، نسبت به استقرار ردیف‌هایی از موانع اقدام نمود. در واقع ردیف‌هایی که پشت سر هم موازی و یا زیگزاگ هستند موجب تشکیل موج در طول قابل توجهی از مسیر حرکت می‌شود که به پایداری و قابل مشاهده بودن موج کمک فراوانی می‌کند. نکته‌ای که می‌بایست به آن اشاره نمود این است که علاوه بر پایداری موج، در اثر نحوه عبور سیال و فواصل بین این ردیف‌ها متناسب آرایش موانع ( زیگزاگ یا موازی) ممکن است پایه‌های هر ردیف تأثیری بر ردیف‌های قبل و بعد خود داشته باشد که این موضوع در موج عرضی هم می‌تواند اثر داشته باشد که به آن پرداخته خواهد شد. (شکل شماره ۱ و ۲).

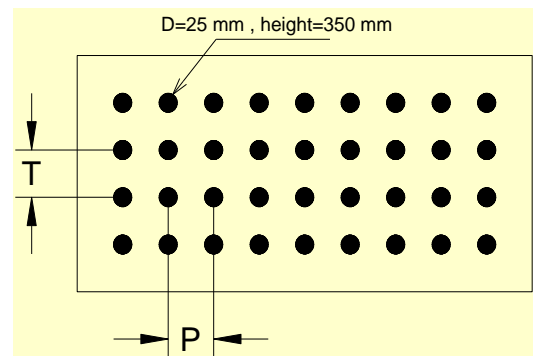
و قابل مشاهده) وجود داشته باشد به همین جهت می‌بایست تعدادی از موانع در کنار یکدیگر قرار داد تا در اثر جمع نوسانات تولید شده ناشی از هر مانع و بوجود آوردن شرایط فیزیکی امکان تشکیل این موج فراهم شود. به بیان ساده‌تر این موانع می‌بایست در کنار یکدیگر و در جهت عرض کانال (عمود بر مسیر حرکت جریان) قرار گیرند.

### چیدمان موانع پشت سر یکدیگر

موضوع مهمی که در مطالعه این امواج می‌بایست به آن اشاره شود پایداری موج است. در محیط سیال چنانچه یک آشفتگی ایجاد شود بر اثر وجود وزن سیال و نیز عوامل دیگر نظیر مومنتم ناشی از حرکت سیال، امکان از بین رفتن این آشفتگی



شکل ۲. آرایش زیگزاگ



شکل ۱. آرایش موازی

بسیار کم است. اولین یافته‌ها به تحقیقات Crasse (1939) مربوط می‌شود [۲]. در تحقیق دیگری (zima and Ackermann (2002) برای شبیه‌سازی مقادیر ماکزیمم دامنه امواج عمود بر جریان بصورت بی بعد ( $A/h$ ) ارائه کرده اند [4]. در تحقیق جدیدی (Ghomeshi et al. (2007) تشکیل امواج عمود بر جریان در مجاری رو باز را بررسی و روابطی برای محاسبه دامنه و فرکانس امواج پیشنهاد کرده اند [۳].

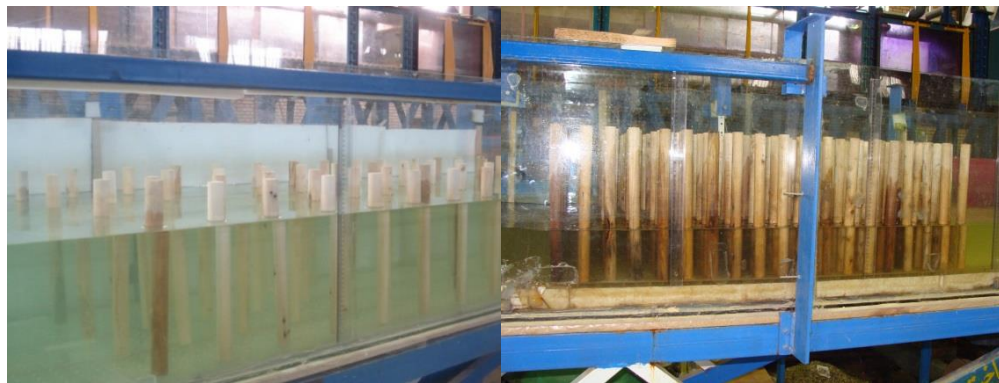
### پیشینه تحقیق

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)، بلوین (Blevins (1977)، (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

**مواد و روش‌ها**

در این تحقیق یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۷۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و شیب ثابت ۰/۰۰۵ مورد استفاده قرار گرفت. دبی جریان در طول آزمایش‌ها ثابت و برابر ۱۰ لیتر در ثانیه بود. کنترل عمق (و سرعت) توسط دریچه‌ای کشویی که در انتهای فلوم نصب شده، صورت می‌گرفت. در این تحقیق در هر آزمایش به طور متوسط از ۲۵۰ عدد استوانه چوبی به قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر بعنوان موانع مسیر

جریان در فلوم آزمایشگاهی استفاده شد. تمام کف فلوم با استفاده از ورق‌های پلکسی گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر پوشانده شد. ورق‌های پلکسی گلاس به صورت شبکه‌ای، در دو جهت طولی و عرضی با فواصل ۳ سانتی‌متر رزوه شده بودند به گونه ای که امکان نصب موانع استوانه ای با فواصل مختلف P و T (فاصله بین موانع متوالی در هر ردیف و P فاصله ردیف‌ها از یکدیگر است) و در دو آرایش موازی (in-line) و زیگزاگی (staggered) روی آن‌ها وجود داشت (شکل شماره ۳).



شکل ۳. نحوه آرایش موانع استوانه ای در فلوم آزمایشگاهی

در این تحقیق ۳ آزمایش با تراکم‌های مختلف موانع استوانه‌ای انجام شد (مشخصات کلی آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه شده است). در این آزمایش‌ها پس از برقراری جریان، ارتفاع دریچه کشویی از یک مقدار حداکثر (متناسب با عمق جریانی که امواج عمود بر جریان شکل می‌گیرند) تا ارتفاع صفر با گام‌های ۵

میلی‌متر تغییر می‌کرد، با کاهش تدریجی عمق جریان هماهنگ‌های مختلف موج (n = 1,2,3,4) در امتداد عرض فلوم آزمایشگاهی تشکیل می‌شد. به دلیل وضوح بیشتر هماهنگ‌های اول و دوم n = 1,2 اقدام به ثبت خصوصیات (فرکانس، طول موج و...) برای این دو حالت شد.

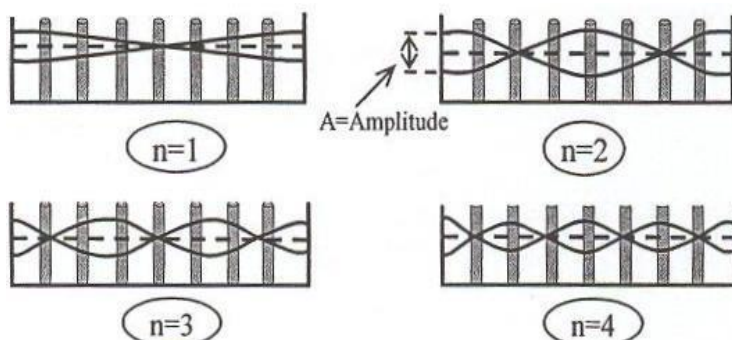
جدول ۱. مشخصات کلی آزمایش‌های انجام شده

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
number of experiment	T (mm)	P (mm)	obstacles arrangements	B (mm)	Q (lit/s)	N	T/D	P/D
1	90	90	staggered	720	10	7.5	3.6	3.6
2	60	60	in-line	720	10	11	2.4	2.4
3	60	60	staggered	720	10	11	2.4	2.4

### مشاهدات آزمایشگاهی

با کاهش تدریجی عمق جریان (با کاهش ارتفاع دریاچه پایین دست با گام‌های ۵ میلی‌متر در هر مرحله) موج  $n=1$  با دامنه کم شروع به نوسان می‌کند، با کاهش بیشتر عمق جریان دامنه موج  $n=1$  بیشتر می‌شود تا اینکه به یک مقدار حداکثر، در حالت تشدید (Resonance) می‌رسد (شکل شماره ۴). با کاهش مجدد عمق جریان، دامنه موج روند نزولی را طی می‌کند تا اینکه موج  $n=1$  بطور کامل محو می‌شود و نوسان سطح آب صفر می‌شود و یا در یک مرحله انتقالی و بدون صفر شدن دامنه وارد موج نوع دوم  $n=2$  می‌شود. با کاهش بیشتر عمق جریان به تدریج دامنه موج در حالت  $n=2$  افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک حداکثر با کاهش عمق جریان دامنه موج روند نزولی را طی می‌کند و وارد موج نوع سوم  $n=3$  می‌شود.

در جدول ۱، در ستون (۱) شماره آزمایش‌ها مشخص شده است، در ستون‌های (۲) و (۳) فواصل عرضی (T) و طولی (P) مشخص شده است، در ستون (۴) آرایش موانع، در ستون (۵) عرض فلوم آزمایشگاهی، در ستون (۶) دبی جریان، در ستون (۷) تراکم موانع (که عبارت است از میانگین تعداد موانع در دو ردیف متوالی)، در ستون (۸) نسبت بدون بعد فاصله عرضی به قطر موانع (D) و در ستون (۹) نسبت بدون بعد فاصله طولی به قطر موانع مشخص شده است. پارامترهای عمق جریان در فلوم آزمایشگاهی و دامنه امواج (به صورت حداکثر جابجایی سطح جریان روی دیواره فلوم) در سه مقطع در طول ناحیه مانع گذاری شده، اندازه گیری می‌شد، همچنین در این مرحله نوع موج مشاهده شده ( $n=1,2,\dots$ ) نیز ثبت می‌شد.



شکل ۴. انواع امواج سطحی عمود بر جریان در مجاری روباز

### نتایج و بحث

برای نشان دادن شرایط هیدرولیکی جریان در حداکثر دامنه امواج در هر یک از انواع امواج، نمودار دامنه موج در مقابل عمق جریان ( $A-h$ ) رسم می‌شود (شکل شماره ۵).

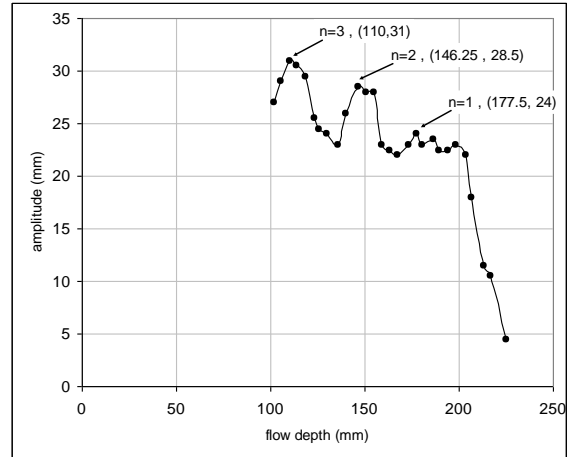
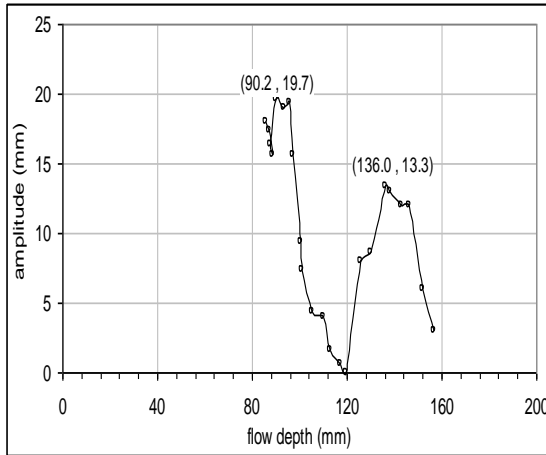
بر اساس مطالعات لینهارد (Linhard, 1966) ورتکس پایین دست موانع زمانی بوجود می‌آید که عدد رینولدز موانع ( $UD/v$ ) در یکی از دو محدوده زیر

### نحوه ثبت فرکانس

هر حرکت کامل بالا رفتن و سپس پائین آمدن سطح آب را به عنوان یک نوسان در نظر گرفته می‌شود و تعداد این نوسان‌ها در فاصله زمانی یک دقیقه در هر مرحله یادداشت می‌شود. قرائتهای لازم در کلیه مراحل ثبت می‌گردید.

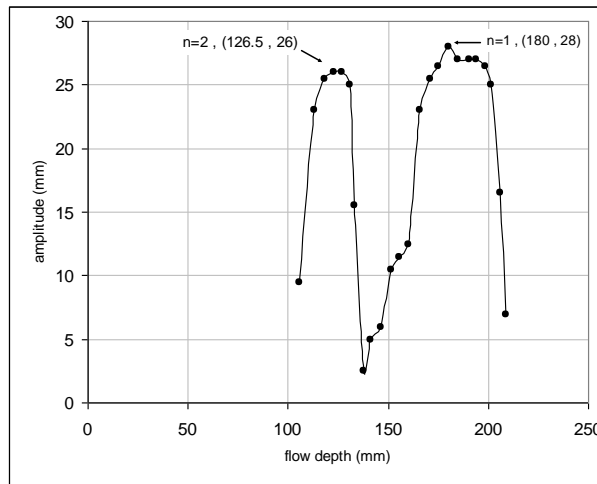
در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق عدد رینولدز موانع در محدوده اول (۳۰ تا ۳۰۰,۰۰۰) قرار داشت، همچنین در طول آزمایشها رژیم جریان (براساس عدد فرود) زیر بحرانی بود.

قرار داشته باشد که  $U$  سرعت جریان،  $D$  قطر موانع استوانه‌ای و  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال می‌باشد [۲].  
 (۱)  $40 < Re < 3 \times 10^5$  ,  $Re > 3.5 \times 10^6$



الف. آزمایش اول Stagger  $P=90, T=90$ : زیگزاگ

ب. آزمایش دوم  $P=60, T=60$  موازی



ج. آزمایش سوم زیگزاگ  $P=60, T=60$ , Stagger

شکل ۵. نمودارهای A-h در آزمایش‌های مختلف

### اندازه طول موج

موج عمود بر جریان دارای طول موجی است که این طول موج تابعی از عرض کانال است. در هماهنگ اول  $n=1$  خواهیم داشت  $\lambda = \frac{l}{2}$  و در هماهنگ دوم  $n=2$  خواهیم داشت  $\lambda = l$  و ...

### نتیجه‌گیری

بر اثر عبور جریان آب پیرامون موانع نصب شده در کانال، به دلیل ورتکس موانع، نوسانی در پشت هر مانع ایجاد می‌شود، در اثر هم‌پوشانی این نوسانات و سازگار شدن شرایط فیزیکی در کانال، موجی عمود بر جریان بوجود می‌آید که به آن موج عمود بر جریان ناشی از ورتکس گفته می‌شود.

### شکل موج

شکل موج تشکیل شده یک موج ایستا می باشد که این موج در اثر تداخل دو موج رفت و برگشتی ناشی از برخورد با بدنه کانال تشکیل می شود .

### فرکانس موج

فرکانس موج یا تعداد نوسان در ثانیه موج در طول هر آزمایش و در هر شکل موج (هماهنگ) یک عدد را به خود اختصاص می دهد. به عبارتی فرکانس موج، با تشکیل یک شکل موج، ثابت باقی می ماند . هم چنین فرکانس موج در هماهنگ دوم  $n=2$  نسبت به هماهنگ اول  $n=1$  مطابق اعداد بدست آمده تقریباً  $1/5$  (یک و نیم) برابر می باشد .

در هر آرایش از موانع، فرکانس هر شکل موج ، با فرکانس موج مشابه در آزمایش دیگر با هم فرق خواهد داشت. براین اساس می توان نتیجه گرفت که فرکانس به تعداد مانع مستقر در هر ردیف عرضی نیز بستگی دارد.

### اندازه دامنه

درصد دامنه موج نسبت به عمق آب در حداکثر مقدار دامنه مطابق جدول ۲ می باشد همچنین مقدار دامنه در حداکثر مقدار مطابق جدول ۳ می باشد. براساس این جداول نتیجه می گیریم با کاهش فاصله موانع در هر حالت موج، افزایش مقدار دامنه را داریم ولی افزایش دامنه نسبت به عمق (افزایش نسبی) از حالت فوق تبعیت نمی کند.

جدول ۲. درصد دامنه موج نسبت به عمق

موج نوع سوم $n=3$	موج نوع دوم $n=2$	موج نوع اول $n=1$	Arrangement of obstacles
-	22%	10%	Stagger $P=90, T=90$ ; The first experiment
28%	17%	14%	In-line $P=60, T=60$ ; Second experiment
-	20%	16%	Stagger $P=60, T=60$ ; Third experiment

جدول ۳. مقدار حداکثر دامنه در هر آزمایش

موج نوع دوم (mm)	موج نوع اول (mm)	Arrangement of obstacles
19.7	13.3	Stagger $P=90, T=90$ ; The first experiment
25	24	In-line $P=60, T=60$ ; Second experiment
26	28	Stagger $P=60, T=60$ ; Third experiment

### منابع

- انتظاری، علیرضا. (۱۳۸۱). "مکانیک سیالات"، نشر نوپردازان، تهران.
- Crasse., 1939, About Oscillation Phenomenon on Water Surface Part 1: Flow Around Obstacle Form Piles of Bridge, Coptes Rendus de Sèances de l'Academie de Sciences, 209, (in French).
- Ghomeshi, m., Motazavi-Dorcheh, S.A. and Falconer, R., "Amplitude of Wave Formation by Vortex Shedding in Open Channels ", Journal of Applied Sciences , 2007 Asian Network for Scientific Information, p.p. 3927-3934
- Zima, L., and Ackermann, N.L. "Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions." ,2002, J. of Hydraulic Engineering, ASCE.