

بررسی تاثیر امواج عرضی نوع ۱ و ۲ بر غلظت رسوبات معلق پایین دست موانع در مجاری روباز

فاطمه طاهریان^{۱*}، مهدی قمشی^۲، سنا جاسمی زرگانی^۳ و ندا پوستی زاده^۴

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۱

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات خوزستان

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

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۴ دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: taherian.fatemeh@yahoo.com

چکیده

در بسیاری از مواقع مجموعه‌ای از موانع در مسیر حرکت آب قرار می‌گیرند که با عبور آب از بین آنها، در پایین دست موانع جریان‌های ورتکس ایجاد می‌شود. از همپوشانی ورتکس ایجاد شده از هر کدام از موانع، امواج عرضی که راستای انتشارشان عمود بر جهت جریان آب است تشکیل می‌شوند. این امواج سبب کاهش انتقال رسوبات معلق به سمت پایین دست موانع می‌گردند. در این تحقیق میزان تاثیر امواج عمود بر جریان نوع ۱ و ۲ بر غلظت رسوبات معلق پایین دست موانع در یک فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در هر یک از آزمایش‌ها، جهت مقایسه نتایج، غلظت رسوبات معلق در دو حالت با و بدون وجود موج عرضی، در دو مقطع انتهایی فلوم اندازه‌گیری شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در دامنه برابر برای موج نوع ۱ و ۲، توانایی موج عرضی نوع ۱ در پس زدن رسوبات معلق به سمت بالادست موانع و کاهش غلظت آنها در پایین دست موانع بیشتر از موج نوع ۲ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: غلظت رسوبات معلق، موج عمود بر جریان، ورتکس

Investigation of the Effect of Transverse Wave Modes 1 and 2 on Suspended Sediment Concentration Downstream of the Obstacles in Open Channels

F Taherian^{1*}, M Ghomeshi², S Jassemi Zergani³ and N Poustizadeh⁴

Received: 18 November 2012 Accepted: 2 November 2013

¹ M.Sc. Student., Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Islamic Azad-olom Tahghighat of Khuzestan, Iran

² Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran (SCU), Ahwaz, Iran

³ M.Sc., Student., Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran (SCU), Ahwaz, Iran

⁴ Ph.D. Student., Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran (SCU), Ahwaz, Iran

*Corresponding Author Email: Taherian.fatemeh@yahoo.com

Abstract

In many cases some series of obstacles are placed in the path of water, the water passes through them and at the obstacles downstream the vortex flows are created. By overlapping the created vortices by the obstacles, transverse waves that their propagation direction is perpendicular to the direction of the water flow are formed. These waves cause reduction of the suspended sediment transfer toward the downstream of the obstacles. In this study, the effects of the perpendicular waves in flow modes 1 and 2 on the suspended sediment concentration at the downstream of the obstacles were studied, in a laboratory flume. In each experiment for comparing the results, the suspended sediment concentrations were measured in two conditions (with and without the presence of transverse waves) at the 2 end points of the flume. The results show that at equal amplitudes of the waves, modes 1 and 2, the ability of transverse wave mode 1 in the rejection of suspended sediment toward the upstream and reducing its concentration in the downstream of the obstacles is greater than that of the Wave mode 2.

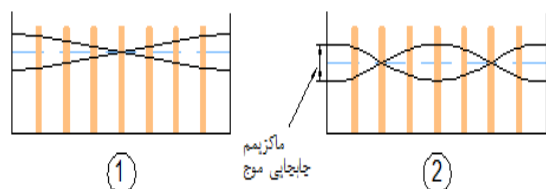
Keywords: Suspended sediment concentration, Transverse wave, Vortex

مقدمه
از بین حرکت‌های مکانیکی بسیار متنوعی که در طبیعت رخ می‌دهد، اغلب با حرکت‌های تکراری مواجه می‌شویم. هر چرخش یکنواخت یک حرکت تکراری است. حرکت تکراری را هنگامی دوره‌ای می‌نامند که هر دور آن دقیقاً در دوره‌های دیگر تجدید شود. اجسام و وسایلی که خودشان می‌توانند حرکت‌های دوره‌ای را انجام دهند یعنی توسط نیروهای دوره‌ای خارجی وادار به نوسان نمی‌شوند، دستگاه‌های نوسانی نامیده می‌شوند که نقش بسیار مهمی را در طبیعت و به

خصوص صنعت ایفا می‌نمایند. نوسان‌هایی که این دستگاه‌ها بدون تاثیر نیروهای خارجی انجام می‌دهند، نوسان‌های آزاد و نوسان‌هایی را که تحت تاثیر نیروی متغیر دوره ای انجام می‌گیرد نوسان‌های واداشته می‌نامند. اگر دستگاه نوسانی تحت تاثیر متغیر دوره‌ای قرار گیرد، حرکت دوره‌ای ایجاد می‌شود که در آن دوره ارتعاش‌های واداشته، مساوی دوره نیروی وارد شده است (کاشیگر و مقبلی ۱۳۷۷). امواج عرضی ایجاد شده در اثر برخورد جریان سیال با موانع استوانه‌ای نمونه‌ای از نوسان‌های داشته می‌باشد که در آن نیروی

عدد موج نسبتی است که تعداد نقاط پیک در واحد طول را بیان می‌کند، به عنوان مثال در موج نوع ۲، دو گره در عرض فلوم جا دارد (عطایی آشتیانی و بهشتی ۱۳۸۶). شکل ۲ تشکیل امواج عمود بر جریان نوع ۱ و ۲ را در کانال‌های روباز به صورت شماتیک نشان می‌دهد. رابطه ی بین عرض فلوم (b) با طول موج تولید شده (λ) و عدد موج (n) به صورت زیر است.

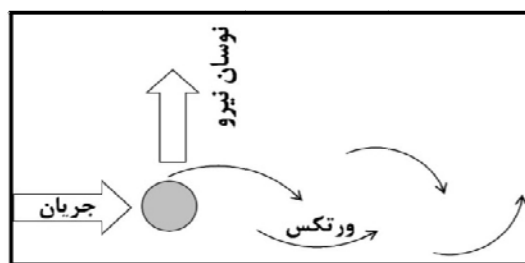
$$b = \frac{n\lambda}{2} \quad [1]$$



شکل ۲- تشکیل امواج عمود بر جریان نوع ۱ و ۲ در مجاری روباز.

بیشتر تحقیقات در مورد ورتکس ناشی از عبور سیالات از پیرامون موانع موجود در مسیر جریان، به گازها مربوط می‌شود. عمده تحقیقات در این زمینه توسط افرادی چون (بلوین ۱۹۷۷) و زوکاوسکاس و همکاران (۱۹۸۸) صورت گرفته است. در برابر تحقیقات انجام شده در گازها، تحقیقاتی که به تشکیل گرداب و پدیده‌های مرتبط با آن در محیط آب پرداخته باشند کمتر است. کراس (۱۹۳۹) یافته‌های خود را در مورد امواج تولید شده در کانال‌های باز منتشر کرده است که احتمالاً اولین تحقیق در این زمینه می‌باشد. شوستر (۱۹۶۷) برای زمانی که جاده از روی کانال عبور می‌کند، بوسیله دو سری از پایه‌ها، نوسانات ناشی از پایه‌های پل را مورد بررسی قرار داده است. زیما و اکرم (۲۰۰۲) تحقیقاتی را با دبی ثابت و با موانعی با قطرهای ۱۲/۷ میلی‌متر و ۲۵/۴ میلی‌متر در آب انجام دادند و امواج نوع ۱ و در برخی آزمایشات امواج نوع ۲ را مشاهده و در نهایت رابطه‌ای برای حداکثر دامنه نسبی امواج عرضی ارائه نمودند. قمشی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از موانعی به قطر ۲۴ میلی

تناوبی وارده، نیروی ناشی از کشش ورتکس^۱ بوجود آمده در جریان برخورد با موانع استوانه‌ای بوده و دستگاه نوسانی نیز، موج عرضی در آب می‌باشد. در بسیاری از مواقع موانعی نظیر پایه‌های پل، پایه‌های اسکله، پوشش گیاهی و... در مسیر حرکت آب قرار می‌گیرند. زمانی که یک ذره سیال به سمت لبه ابتدایی یک مانع استوانه‌ای که در مسیر جریان قرار گرفته است حرکت می‌کند، فشار ذره سیال آزاد تا حد فشار دینامیک در نقطه سکون افزایش می‌یابد. فشار بالای سیال در نزدیکی لبه‌های جسم موجب رشد لایه مرزی در دو طرف مانع استوانه‌ای می‌گردد. پس از جدایی خطوط جریان در پایین دست موانع لایه‌های برشی و ورتکس ایجاد می‌گردد، چنانچه مجموعه‌ای از موانع در مسیر جریان آب قرار بگیرند از هم پوشانی ورتکس ایجاد شده از هر کدام از موانع، امواج عرضی که راستای انتشارشان عمود بر جریان آب است تشکیل می‌شود (جعفری ۱۳۸۹). شکل ۱ نمایی شماتیک از تشکیل ورتکس را در یک سمت مانع استوانه‌ای نشان می‌دهد.



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

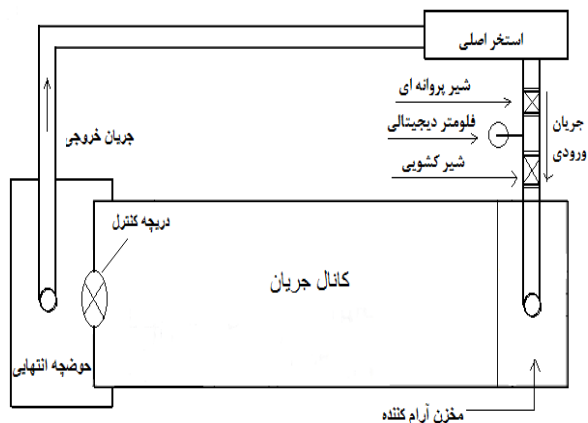
در شرایط تولید موج عرضی حاصل از عبور آب از اطراف موانع، نیروی ناشی از کشش ورتکس به طور تناوبی بر آب وارد شده و زمانی که فرکانس نیروی ورتکس با فرکانس نوسان طبیعی موج عرضی یکسان می‌شود، حالت تشدید بوجود آمده و موج با حداکثر دامنه شکل می‌گیرد (زیما و اکرم ۲۰۰۲).

¹Vortex

تواند گامی مهم در جهت کنترل انتقال رسوبات معلق در مجاری روباز باشد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۷۲ سانتی‌متر و شیب ۰/۰۵ که دارای مقطع مستطیلی بوده و کف و دیواره‌های آن از جنس شیشه هستند، در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است. سیستم گردش آب فلوم به صورت مدار بسته می‌باشد و آب مورد نیاز برای انجام آزمایشات از طریق استخر آب واقع در پشت محوطه آزمایشگاه تامین گردیده است. جریان ورودی از طریق پمپ موجود در بالادست فلوم تامین گشته و میزان دبی جریان که در آزمایشات متغیر می‌باشد به وسیله یک دبی‌سنج دیجیتالی با واحد اندازه‌گیری لیتر بر ثانیه نصب شده در ابتدای سیستم ورودی، اندازه‌گیری شده است. برای تنظیم ارتفاع آب، یک دریچه کشویی در انتهای پایین‌دست فلوم تعبیه شده است که با تغییر ارتفاع این دریچه کشویی می‌توان عمق و سرعت جریان را تغییر داد. جریان ورودی پس از عبور از یک مخزن آرام‌کننده وارد فلوم آزمایشگاهی شده و پس از سرریز شدن از دریچه کشویی، وارد حوضچه انتهایی گشته و از آنجا توسط لوله خروجی به استخر آب انتقال پیدا می‌نماید. در شکل ۳ نمای شماتیک از فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است.

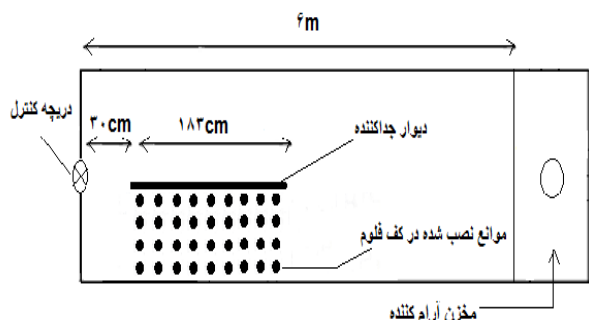


شکل ۳- نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی.

متر توانستند امواج نوع یک، دو، سه و چهار را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده و روابطی برای محاسبه حداکثر دامنه نسبی موج عرضی ارائه نمایند. جعفری (۱۳۸۹) با توجه به استفاده از ۴ قطر مختلف موانع، در دبی‌های متغیر، ده نوع موج عرضی را در فلوم مشاهده و روابطی جهت تعیین دامنه نسبی ماکزیمم امواج عمود بر جریان و عدد استروهل مربوط به مجموعه‌ای از موانع که در مسیر حرکت آب در یک کانال روباز قرار دارد ارائه نموده است.

جعفری و همکاران (۲۰۱۰a) در تحقیقی آزمایشگاهی با انجام ۳۸ آزمایش ده نوع موج را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمودند. این محققین در مقاله‌ای دیگر (۲۰۱۰b) دامنه ده نوع موج عرضی را با انجام ۳۸ آزمایش، در جریان آزاد بر روی موانع مورد بررسی قرار دادند.

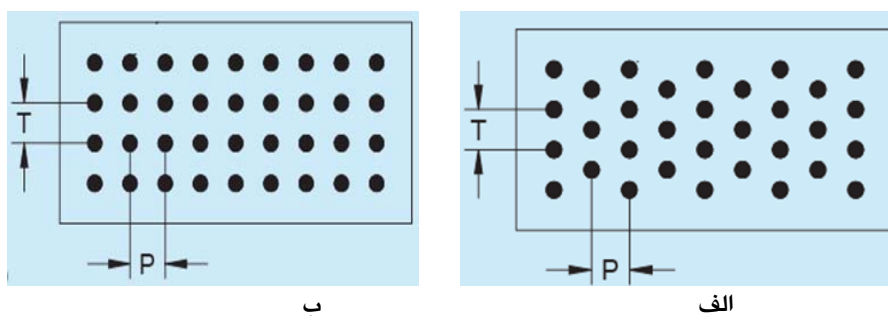
در زمینه تاثیر امواج عمود بر جریان بر انتقال رسوبات در مجاری روباز تا کنون تحقیقات زیادی انجام نشده است. عزیزی (۱۳۸۷) در تحقیق خود تاثیر امواج عمود بر جریان ناشی از موانع را بر انتقال رسوبات مورد بررسی قرار داده و اظهار داشته است که انتقال رسوبات به پایین‌دست ناحیه مانع‌گذاری شده، در نتیجه اثر جمعی آبشستگی موضعی، نیروی برشی جریان و معلق شدن رسوبات در نتیجه امواج صورت می‌گیرد. در تحقیق دیگری قمشی (۱۳۸۸) تاثیر امواج عمود بر جریان را بر شکل بستر مورد مطالعه قرار داده و با توجه به مشاهدات خود بیان کرده است که در فاصله حدود ۷۰ سانتی‌متری موانع، برای برخی مصالح تشکیل فرم بستر ریپل مشاهده می‌شود. همچنین برای مصالح ریز دانه کاهش حجم مصالح و معلق شدن آنها را اظهار داشته است. با توجه به جدید بودن پدیده امواج عرضی ناشی از کشش ورتکس، در زمینه تاثیر این امواج بر حرکت رسوبات معلق در مجاری روباز تا کنون کار تحقیقاتی انجام نشده است بنابراین شناخت چگونگی این مساله که هدف تحقیق حاضر می‌باشد، می



شکل ۴- نمایی شماتیک از محل قرارگیری دیوار جداکننده در کانال.

موانع مورد استفاده در این تحقیق استوانه‌های چوبی به قطر ۲۵ و ۴۲ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر می‌باشند که تحت آرایش‌های موازی زیگزاگ با فواصل مختلف P و T به صفحات پلکسی گلاس پیچ شده‌اند (شکل ۵). قابل ذکر است که برای انجام آزمایشات، موانع فقط در طول یک طرف دیوار جداکننده نصب شده‌اند تا پس از برقراری جریان امواج عرضی ناشی از موانع فقط در طول یک سمت دیوار جداکننده تشکیل شده و در سمت دیگر دیواره هیچ اثری از موج وجود نداشته باشد. شکل ۶ دو نمونه از نحوه آرایش موانع را در طول یک طرف دیوار جداکننده نشان می‌دهد.

برای انجام این تحقیق، عرض فلوم از فاصله ۳۰ سانتی‌متری انتهای آن، توسط یک دیوار جدا کننده از جنس پلکسی گلاس، به طول ۲ متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر به دو قسمت مساوی تقسیم شده است به طوری که تقسیم دبی به طور کاملاً مساوی صورت بگیرد. به دلیل اینکه در طول آزمایش‌ها، کف فلوم از محدوده بعد از مخزن آرام کننده تا ابتدای دیوار جداکننده (طول تقریبی ۳۸۵cm)، به ضخامت ۳ سانتی‌متر به طور یکنواخت از رسوبات پوشانده می‌شود، در طول آزمایشات، به منظور هم‌سطح شدن رسوبات ریخته شده با محدوده دیوار جداکننده، کف فلوم در قسمت دیواره ۳ سانتی‌متر بالا آورده شده است تا بعد از ریختن رسوبات، کف کانال هم سطح شود و پس از آن تمام کف فلوم توسط صفحات پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر پوشانده شده است. شکل ۴ محل قرارگیری دیوار جداکننده را در فلوم به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



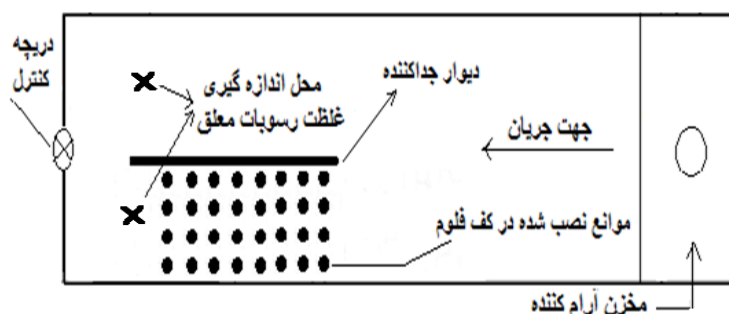
شکل ۵- الف: آرایش زیگزاگ موانع، ب: آرایش موازی موانع.



شکل ۶- تصاویری از نحوه ی آرایش موانع در طول یک طرف دیوار جداکننده عرض کانال.

مانع‌گذاری قرار داده شده بود، انجام گرفته و از میانگین آنها به عنوان دامنه نسبی موج استفاده شده است. هر یک از آزمایشات برای هر کدام از امواج عرضی نوع ۱ و ۲، طی دو مرحله صورت گرفته است، در مرحله اول، غلظت رسوبات معلق در یک مقطع در انتهای دیوار جداکننده در سمت موانع و مقطعی کاملاً مشابه در سمت بدون مانع (شکل ۷) در سه عمق $0.2 h$ و $0.6 h$ و $0.8 h$ اندازه‌گیری و از میانگین آنها به عنوان غلظت متوسط رسوبات معلق در آن مقاطع استفاده شده است. در مرحله دوم هر یک از آزمایشات، ارتفاع دریچه کشویی تا جایی بالا آورده شده است که موج عرضی موجود کاملاً حذف شود و پس از آن غلظت رسوبات معلق مشابه مرحله قبل اندازه‌گیری شده است.

در تمام آزمایشات این تحقیق در حالتی که موانع مستغرق هستند هیچ موجی در کانال تشکیل نشده است و پس از آن با کاهش تدریجی عمق جریان (با کاهش ارتفاع دریچه کشویی) موج $n=1$ با دامنه کم شروع به نوسان می‌کند و با کاهش بیشتر عمق، دامنه موج افزایش می‌یابد تا جایی که در حالت تشدید به یک مقدار حداکثر رسیده و پس از آن با کاهش مجدد عمق جریان دامنه کاهش می‌یابد و موج نوع ۱ کاملاً محو می‌شود؛ در ۷ مورد از آزمایشات انجام شده با کاهش بیشتر عمق جریان به تدریج موج $n=2$ تشکیل می‌شود که این موج هم پس از رسیدن به مقدار دامنه حداکثر در کاهش‌های بعدی عمق جریان، به تدریج از بین می‌رود. اندازه‌گیری دامنه توسط خط‌کش‌هایی که در ۳ مقطع در طول ناحیه



شکل ۷- محل اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق.

در این تحقیق (سیلیس ریز با $D_{50}=0.12\text{mm}$) می‌توان رابطه‌ای برای تبدیل مقادیر کدورت به غلظت بر حسب واحد گرم بر لیتر بدست آورد، شکل ۹ منحنی کالیبراسیون دستگاه و معادله مربوط را نشان می‌دهد.

غلظت رسوبات معلق توسط دستگاه کدورت سنج اندازه‌گیری شده است (شکل ۸). این دستگاه مقادیر کدورت را بر حسب واحد NTU اندازه‌گیری می‌کند که پس از کالیبره کردن دستگاه با رسوبات مورد استفاده

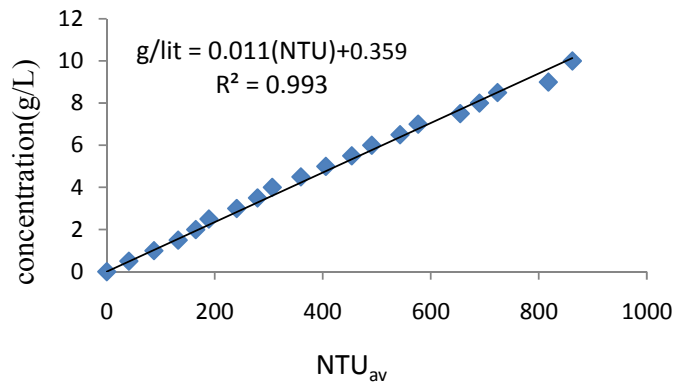


ب



الف

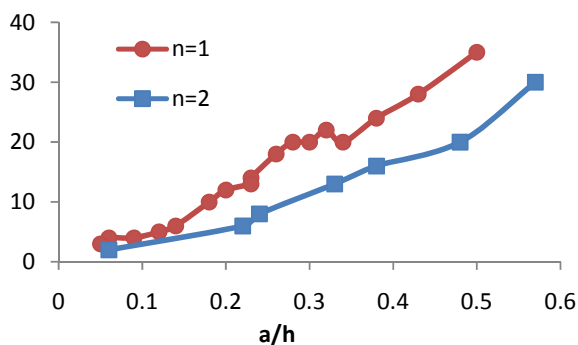
شکل ۸- الف: دستگاه کدورت سنج، ب: نحوه اندازه گیری کدورت جریان در آزمایشات.



شکل ۹- منحنی کالیبراسیون دستگاه کدورت سنج و معادله مربوط به آن.

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایشات انجام شده در تحقیق

۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
a/h (...)	Q (L/s)	N (...)	آرایش (...)	P (mm)	T (mm)	D (mm)	شماره آزمایشات (...)
-/۲۳	۱۰	۳	موازی	۱۲۰	۱۲۰	۴۲	۱
-/۲۸	۱۴	۲	موازی	۱۲۰	۱۲۰	۴۲	۲
۶	۱۳	۲.۵	زیگزاگی	۱۲۰	۱۲۰	۴۲	۳
۱۴	۱۷	۲.۵	زیگزاگی	۱۲۰	۱۲۰	۴۲	۴
۱۲	۱۷	۳	موازی	۱۸۰	۱۲۰	۴۲	۵
۵۰	۱۲	۲	موازی	۱۸۰	۱۸۰	۴۲	۶
۲۳	۱۰	۵	موازی	۱۲۰	۶۰	۴۲	۷
۲۸	۱۱	۳.۵	زیگزاگی	۹۰	۹۰	۴۲	۸
بدون موج	۱۰	۱	موازی	۹۰	۰	۴۲	۹
بدون موج	۱۵	۱	موازی	۱۲۰	۰	۴۲	۱۰
۳۳	۱۱	۲	موازی	۶۰	۱۲۰	۲۵	۱۱
۴۸	۵	۴	موازی	۶۰	۶۰	۲۵	۱۲
۵۷	۸.۵	۴	موازی	۶۰	۶۰	۲۵	۱۳
۲۷	۱۰.۵	۴	موازی	۶۰	۶۰	۲۵	۱۴
۶	۱۵	۴	موازی	۱۲۰	۶۰	۲۵	۱۵
۲۶	۱۰	۴	موازی	۱۲۰	۹۰	۲۵	۱۶
۲۰	۱۰	۲	موازی	۱۲۰	۱۲۰	۲۵	۱۷
۹	۱۰	۲	موازی	۱۲۰	۱۸۰	۲۵	۱۸
۳۰	۱۰	۴	موازی	۱۲۰	۶۰	۲۵	۱۹
بدون موج	۱۰	۱	موازی	۶۰	۰	۲۵	۲۰



شکل ۱۰- تغییرات اختلاف غلظت رسوبات معلق دو سمت دیوار جداکننده در مقابل تغییرات دامنه بی بعد موج.

همان‌طور که نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد، با افزایش دامنه موج، توانایی موج در کاهش غلظت رسوبات معلق پایین‌دست موانع افزایش می‌یابد و در دامنه برابر، تاثیر موج نوع ۱ در کاهش غلظت رسوبات معلق بیشتر از موج نوع ۲ می‌باشد، دلیل این موضوع را می‌توان چنین بیان نمود که با توجه به اینکه امواج براساس نسبت عمق جریان به طول موج به ۳ دسته امواج آب عمیق ($h/\lambda > 0.5$)، کم عمق ($h/\lambda < 0.05$) و بینابین ($0.05 \leq h/\lambda < 0.5$) طبقه‌بندی می‌شوند و در امواج آب عمیق فقط لایه سطحی جریان آب بر اثر حرکت موج متاثر می‌گردد، در صورتی‌که در امواج آب کم عمق، تمام عمق جریان آب با حرکت موج تحت تاثیر قرار خواهد گرفت (شکل ۱۱) (عطایی آشتیانی و بهشتی ۱۳۸۶). براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق و محاسبه h/λ تقریباً موج نوع ۱ در دسته امواج بینابین و موج نوع ۲ در دسته امواج عمیق قرار دارد، بنابراین تاثیر موج نوع ۱ در عمق، بیشتر از نوع ۲ است که این امر باعث می‌شود توانایی موج نوع ۱ در پس زدن رسوبات معلق به سمت بالادست موانع بیشتر از موج نوع ۲ باشد و سبب کاهش بیشتر غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع گردد. شکل ۱۲ نمودار تغییرات h/λ را در مقابل تغییرات عمق جریان برای امواج نوع ۱ و ۲ نشان می‌دهد.

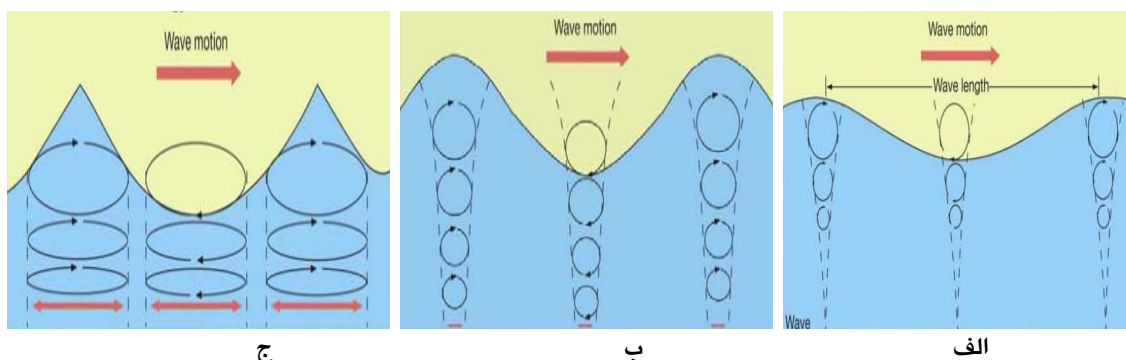
جدول ۱ مشخصات کلی آزمایشات صورت گرفته را نشان می‌دهد. در این جدول D قطر موانع، T و P به ترتیب فواصل عرضی و طولی موانع، N تراکم موانع (میانگین تعداد موانع در دو ردیف متوالی)، L تعداد ردیف‌های موانع و Q دبی جریان را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ در آزمایش‌های شماره ۹، ۱۰ و ۲۰ به دلیل تراکم کم موانع و عدم همپوشانی ورتکس موانع هیچ موجی در کانال تشکیل نشده است. حداکثر دامنه موج مشاهده شده، به صورت درصدی از عمق جریان در ستون ۸ این جدول مشخص شده است.

نتایج و بحث

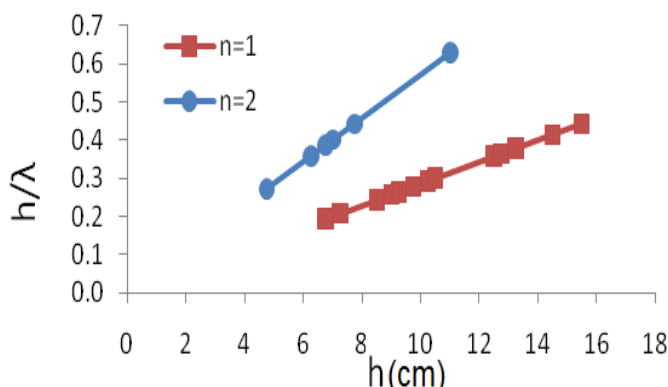
جدول ۲ اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق انتهای دو سمت دیوار جدا کننده را در مرحله اول و دوم آزمایش‌ها نشان می‌دهد. مطابق نتایج این جدول، در مرحله اول هر یک از آزمایش‌ها که موج عرضی با حداکثر دامنه در فلوم تشکیل شده است، غلظت رسوبات معلق انتهای دیوار جداکننده، در سمت موانع کمتر از سمت بدون مانع است و در مرحله دوم که از طریق افزایش عمق جریان؛ موج عرضی کاملاً از بین رفته است، دقیقاً عکس این موضوع اتفاق می‌افتد و غلظت رسوبات معلق انتهای موانع بیشتر از انتهای بدون موانع می‌باشد، علت بروز این پدیده را می‌توان چنین بیان نمود که با توجه به اینکه چگالی آب برابر ۱ و چگالی ذرات رسوب برابر ۲/۶۵ می‌باشد، در حالتی که هیچ موجی درون کانال وجود ندارد خطوط جریان خیلی بیشتر و زودتر نسبت به ذرات رسوبی به سمت بدون مانع که دارای سرعت بیشتری نسبت به سمت مانع دار می‌باشد متمایل می‌شوند در نتیجه در سمت بدون مانع غلظت رسوبات معلق کمتر از سمت موانع می‌باشد ولی در شرایط وجود موج در کانال، موج عرضی با پس زدن رسوبات به سمت بالادست موانع، باعث کاهش انتقال رسوبات به سمت پایین‌دست موانع گشته و در نتیجه غلظت رسوبات معلق در سمت موانع کمتر از سمت بدون مانع خواهد شد. در جدول ۲، n عدد موج عرضی می‌باشد.

جدول ۲- اندازه گیری غلظت رسوبات معلق در آزمایشات انجام شده

شماره آزمایش	n	مرحله اول هر یک از آزمایشات (حالت وجود موج عمود بر جریان)		مرحله دوم هر یک از آزمایشات (حالت عدم وجود موج عمود بر جریان)	
		غلظت رسوبات معلق h (cm)	غلظت رسوبات معلق انتهای دیوار جداکننده (سمت بدون موانع) (g/L)	غلظت رسوبات معلق h (cm)	غلظت رسوبات معلق انتهای دیوار جداکننده (سمت بدون موانع) (g/L)
۱	۱	۹	۰/۴۵۷	۱۱	۰/۴۸۰
۲	۱	۸/۵	۰/۴۲۰	۱۰/۷۵	۰/۴۹۹
۲	۲	۷	۰/۶۱۹	۷/۵	۰/۵۰۸
۳	۱	۱۴/۵	۰/۵۴۳	۱۶	۰/۵۰۷
۴	۱	۱۲/۵	۰/۶۷۲	۱۴	۰/۶۱۵
۵	۱	۱۲/۷۵	۰/۶۹۱	۱۴/۲۵	۰/۵۹۵
۶	۱	۶/۵۷	۰/۵۲۳	۸/۵	۰/۴۴۶
۷	۱	۹/۷۵	۰/۴۸۴	۱۱/۵	۰/۴۴۰
۸	۱	۹	۰/۴۲۹	۱۰/۷۵	۰/۴۵۵
۸	۲	۶/۲۵	۰/۵۴۸	۷/۵	۰/۵۳۵
۱۱	۱	۹	۰/۴۱۴	۱۰/۵	۰/۴۴۳
۱۱	۲	۶/۷۵	۰/۵۴۴	۸/۲۵	۰/۵۱۷
۱۲	۱	۷/۲۵	۰/۳۹۷	۹	۰/۳۸۸
۱۲	۲	۴/۷۵	۰/۴۹۵	۵/۷۵	۰/۵۰۸
۱۳	۱	۹	۰/۴۵۶	۱۱	۰/۴۱۲
۱۳	۲	۴/۷۵	۰/۵۱۰	۷	۰/۵۷۰
۱۴	۱	۱۰/۲۵	۰/۴۶۴	۱۲	۰/۴۳۰
۱۴	۲	۷/۷۵	۰/۵۵۳	۸/۵	۰/۵۱۰
۱۵	۱	۱۵/۵	۰/۵۱۹	۱۶/۷۵	۰/۴۹۳
۱۵	۲	۱۱	۰/۶۱۶	۱۱/۵	۰/۶۱۷
۱۶	۱	۹/۲۵	۰/۴۴۲	۱۱	۰/۴۱۸
۱۷	۱	۱۰/۵	۰/۴۶۱	۱۲	۰/۴۷۸
۱۸	۱	۱۳/۲۵	۰/۴۷۷	۱۴/۲۵	۰/۴۳۸
۱۹	۱	۹	۰/۴۳۰	۱۱/۵	۰/۴۴۶



شکل ۱۱- الف: امواج عمیق، ب: امواج بینابین، ج: امواج کم عمق.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات h/λ در مقابل تغییرات عمق جریان.

نتیجه‌گیری کلی

در اثر عبور سیال از اطراف موانع موجود در مسیر جریان، در بالادست موانع لایه مرزی و در پایین‌دست موانع، جداسازی خطوط جریان اتفاق می‌افتد که سبب تشکیل ورتکس می‌گردد. وجود موانع و شرایط جریان عبوری موجب تشکیل امواج عمود بر جریان می‌شود. با توجه به اینکه وجود این امواج سبب کاهش انتقال رسوبات معلق به سمت پایین‌دست موانع می‌گردد، هدف اصلی این مطالعه مقایسه تاثیر امواج عمود بر جریان نوع ۱ و ۲ بر غلظت رسوبات معلق پایین‌دست موانع بوده است. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، در حالتی که هیچ موجی در کانال وجود ندارد، متوسط غلظت رسوبات معلق انتهای دیوار جداکننده در سمتی که موانع نصب شده‌اند حدود ۴ تا ۱۶ درصد بیشتر از سمتی است که مانعی وجود ندارد و در حالت وجود موج عرضی با حداکثر دامنه، دقیقاً عکس این موضوع اتفاق افتاده است و غلظت رسوبات معلق در سمت موانع در شرایط وجود موج عرضی نوع ۱ حدود ۳ تا ۳۵ درصد و در شرایط موج عرضی نوع ۲ حدود ۲ تا ۳۰ درصد کمتر از سمت بدون مانع می‌باشد. از مقایسه غلظت رسوبات معلق در انتهای دیوار جداکننده در سمت موانع با غلظت رسوبات

معلق در سمت بدون مانع، در دو حالت با و بدون موج عرضی در کانال، می‌توان نتیجه گرفت که امواج عمود بر جریان بر انتقال رسوبات معلق به سمت پایین‌دست موانع به صورت کاملاً مشخص تاثیر دارد و با کاهش انتقال رسوبات معلق به سمت پایین‌دست موانع، باعث کاهش غلظت رسوبات معلق آن منطقه می‌گردد. تفاوت غلظت رسوبات معلق دو سمت دیوار جداکننده در حالت وجود امواج عمود بر جریان، نشانه ته‌نشینی رسوبات معلق و یا انتقال به بازه ی بدون مانع می‌باشد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش دامنه نسبی موج، توانایی موج عمود بر جریان در پس زدن رسوبات معلق به سمت بالادست موانع بیشتر است و در دامنه برابر برای موج نوع ۱ و ۲، توانایی موج عرضی نوع ۱ در کاهش غلظت رسوبات معلق سمت بازه موانع نسبت به بازه بدون مانع بیشتر از موج عرضی نوع ۲ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توانایی موج ۱ در پس زدن رسوبات معلق به سمت بالادست موانع و کاهش انتقال آنها به سمت پایین‌دست موانع بیشتر از موج نوع ۲ می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- جعفری ا، ۱۳۸۹. بررسی امواج عمود بر جریان ناشی از کشش ورتکس پشت موانع با قطرها و دبی‌های مختلف در کانال‌های روباز با استفاده از مدل فیزیکی. پایان‌نامه دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز. عزیزری ر، ۱۳۸۷. بررسی تاثیر امواج عمود بر جریان ناشی از ورتکس موانع بر ظرفیت انتقال رسوبات در مجاری روباز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

- عطایی آشتیانی ب و بهشتی ع، ۱۳۸۶. مکانیک امواج آب (ترجمه). جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.
- قمشی ع، ۱۳۸۸. امواج عمود بر جریان ناشی از ورتکس موانع در مجاری روباز و تاثیر آن بر شکل بستر. صفحه‌های ۱۲۵ تا ۱۳۴. مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- کاشیگر ل و مقبلی ن، ۱۳۷۷. دوره درسی فیزیک (ترجمه). انتشارات فاطمی.
- Blevins RD, 1977. Flow-induced Vibration, VNR, London, Toronto, Melbourne.
- Crass, 1939. about oscillation phenomenon on water surface part 1: Flow around obstacle from piles of bridge, coptes Rendus de Seances de l'Academie de sciences, 209, (in french)
- Ghomeshi M, Mortazavi Dorcheh SA and Falconer R 2007. Wave formation by vortex shedding in open Channel, Journal of Applied Sciences 7 (24).
- Jafari A, Ghomeshi M, Bina M and Kashefipour SM, 2010a. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels, Scientific International Journal of Food, Agriculture & Environment, JFAE.
- Jafari A, Ghomeshi M, Bina M and Kashefipour SM, 2010b. Comparing of ten modes of oscillation occurring across the open channels, IAHR-APD 2010 Congress, The School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand, 21-24 February. Helsinki, Finland.
- Schuster JC, 1967. Canal Capacity Studies, Wave Formation by Bridge Piers, Hydraulics Branch Rep, HYD-485, U.S. Bureau of Reclamation.
- Zima L and Ackermann NL, 2002. Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions, J of Hydraulic Engineering ASCE. Vol 128(6) Pp, 596-603.
- Zukauskas A, Ulinskas R and Katinas V, 1988. Flow Dynamics and flow Induced Vibrations of Tube Banks, Experimental and Applied Heat Transfer Guide Books. Hemisphere, New York