

بررسی تاثیر دبی بر غلظت رسوبات معلق بالادست و پایین دست موانع در شرایط وجود امواج عمود بر جریان در مجاری روباز

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

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۲۷

^۱ دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران

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

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات خوزستان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nedapzh@gmail.com

چکیده

در این تحقیق پدیده تشکیل امواج عرضی و تأثیر دبی بر غلظت رسوبات معلق در شرایط تشکیل موج‌های مختلف عرضی، در یک فلوم مستطیلی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در حالت عدم وجود موج، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع بیشتر از انتهای بازه بدون موانع می‌باشد. امواج عرضی با کاهش انتقال رسوبات معلق در بازه موانع، باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع می‌گردند. به گونه‌ای که برای موج نوع ۱ و ۲ به طور متوسط درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع به ترتیب حدود ۳/۶ و ۴/۵ درصد بوده است، اما با افزایش دبی تغییر محسوسی مشاهده نشده است. همچنین نتایج نشان داده است که با افزایش دبی، دامنه امواج نوع ۱ افزایش یافته است و بنابراین توانایی موج نوع ۱ برای کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده در بازه موانع حدود ۳ درصد افزایش یافته است. درحالی‌که برای موج نوع ۲، با افزایش دبی، این توانایی حدود ۷ درصد کاهش یافته است. بررسی‌های انجام شده در بازه بدون موانع دلالت بر این امر دارد که درصد غلظت رسوبات معلق منتقل شده برای موج نوع ۲ با افزایش دبی حدود ۳ درصد افزایش یافته است. اما برای موج نوع ۱ کاهش یافته است و رسوبات در بالادست بازه موانع ته نشین شده‌اند. بنابراین توانایی موج نوع ۲ نسبت به موج نوع ۱ جهت انتقال رسوبات معلق در شرایط بدون موانع بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: دبی، غلظت رسوبات معلق، گرداب، موج عرضی

Investigating the Discharge Effect on Suspended Sediment Concentration Upstream and Downstream of Obstacles in the Presence of Transverse Waves in Open Channels

N Poustizadeh¹, M Ghomeshi² and F Taherian³

Received: 20 July 2013 Accepted: 19 October 2013

¹- Ph.D. Student, Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran (SCU), Ahwaz, Iran

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

³- M.Sc., Student, Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Islamic Azad-Olom Tahghighat of Khuzestan, Iran

* Corresponding Author Email: nedapzh@gmail.com

Abstract

The present study has been focused on the formation of transverse waves and the effect of discharge on suspended sediment concentration in the presence of transverse wave based on laboratory tests in a rectangular flume. The results showed that in no transverse wave condition, the concentration of suspended sediment at downstream of obstacles zone was more than that in the absence of obstacles. Transverse waves decreased the transportation of suspended sediment in obstacles zone, so that in the case of existing transverse waves, the concentration of suspended sediment at downstream of obstacles zone was less than that in no obstacles condition. The average values of reduced concentration percentages at downstream of obstacles zone relative to the condition with no obstacles zone, for wave modes 1 and 2 were about 3.6% and 4.5%, respectively. But any significant change was not seen by an increase of discharge for wave modes 1 and 2. Also the results indicated that an increase of discharge caused an increase in the maximum amplitude of the wave mode 1, so that the ability of the wave mode 1 for suspended sediment transportation in obstacles zone was increased about 3%, while, it was reduced for the wave mode 2 about 7%. According to the findings, increase of the discharge for the wave mode 2 caused an increase of the transported sediment concentration about 3% in no obstacles condition. But it was decreased for the wave mode 1 and the suspended sediment was deposited at upstream of the obstacles zone. Therefore, the wave mode 2 is more capable of transporting suspended sediment under condition of no obstacles zone than the wave mode 1.

Keywords: Discharge, Suspended sediment concentration, Transverse wave, Vortex

مایدات) 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

مقدمه

در جریان‌های آزاد و تحت فشار سیالات، هنگامی که جسم جامدی در مسیر جریان سیال (اعم از گازها و

اند و امواج نوع ۱ و در برخی آزمایشات امواج نوع ۲ را مشاهده کرده‌اند، زیما و اکرم (۲۰۰۲) در نهایت رابطه-ای برای شبیه‌سازی مقادیر ماکزیمم دامنه امواج عرضی به صورت بی‌بعد ارائه کرده‌اند. قمشی و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیق دیگری آزمایشات خود را با استفاده از موانعی به قطر ۲۴ میلی‌متر در آب انجام دادند و توانستند امواج نوع ۱، ۲، ۳ و ۴ را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمایند و روابطی را برای محاسبه دامنه و فرکانس امواج پیشنهاد کرده‌اند. جعفری و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق خود رابطه‌ای جهت محاسبه دامنه نسبی ماکزیمم امواج عرضی و محاسبه عدد استروهل مربوط به مجموعه‌ای از موانع که در مسیر جریان قرار دارند ارائه کرده‌اند.

در زمینه تأثیر امواج عرضی بر انتقال رسوبات در مجاری روباز تا کنون تحقیقات زیادی انجام نشده است. عزیزی و قمشی (۱۳۸۹) دو رابطه برای تعیین فرکانس امواج حاصل از پدیده ارتعاش ناشی از گرداب در مجاری روباز ارائه کرده‌اند. در تحقیق دیگری قمشی (۱۳۸۸) تأثیر امواج عرضی را بر شکل بستر مورد مطالعه قرار داده و با توجه به مشاهدات خود چنین بیان کرده است که در فاصله حدود ۷۰ سانتی‌متری موانع، برای برخی مصالح تشکیل فرم بستر ریپل مشاهده می‌شود و برای مصالح بسیار ریز کاهش حجم مصالح و معلق شدن آنها را اظهار داشته است.

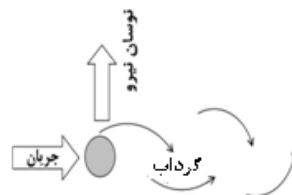
در میان مطالعات صورت گرفته، تأثیر امواج عرضی بر رسوبات معلق تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به اینکه مسئله فرسایش، آبستنگی و انتقال رسوبات در مجاری روباز همواره از مسایل مورد توجه بوده است، لذا هدف از این تحقیق بررسی تأثیر این امواج بر انتقال رسوبات معلق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۸ متر، عرض ۱۰۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و شیب صفر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران انجام شده است. موانع

سکون^۱ 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 بر روی مرز جسم جامد، در اثر گرادیان فشار، پدیده جدایی خطوط جریان^۲ رخ می‌دهد. در پایین‌دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله^۳ و گرداب^۴ به وجود می‌آید.

در شکل ۱ نمای شماتیک تشکیل گرداب در یک سمت مانع استوانه‌ای نشان داده شده است که در نتیجه همپوشانی گرداب ناشی از مانع، امواج عمود بر جریان در سطح جریان و در امتداد عرض آبراهه تشکیل می‌شوند که امواج عرضی نیز نامیده می‌شوند. این امواج، امواج نوسانی (تناوبی) ایستا و عرضی هستند و با توجه به دامنه کم آنها، خطی فرض می‌شوند.



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

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 نظیر فیتزهاگ (۱۹۷۳)، بلوین (۱۹۷۷) و زوکاسکاس و همکاران (۱۹۸۸) و ... صورت گرفته است. در مقابل این موضوع، تحقیقاتی که به تشکیل گرداب و پدیده‌های مرتبط با آن در محیط آب پرداخته باشد بسیار کم است. کراس (۱۹۳۹) یافته‌های خود را در مورد امواج تولید شده در کانال‌های باز منتشر کرده است که احتمالاً اولین تحقیق در زمینه این موضوع می‌باشد. زیما و اکرم (۲۰۰۲) تحقیقاتی را در دبی ثابت و موانع با قطرهای مختلف در آب انجام داده-

¹ Stagnation point

² Separation

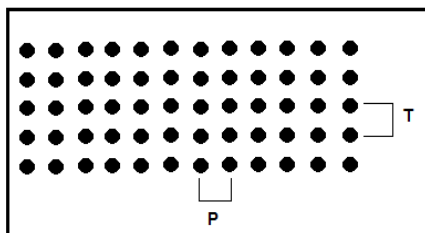
³ Wake

⁴ Vortex

با استفاده از پیچ‌هایی که در انتهای آنها قرار دارند، در امتداد یک سمت دیوار جدا کننده با فواصل طولی (P) و عرضی (T) ثابت و برابر با ۱۲۰ میلی‌متر در آرایش موازی پیچ شده‌اند. از جمله موارد و اهداف مهم در تحقیقات انجام شده پیرامون امواج عرضی، تشکیل این نوع امواج و وقوع پدیده تشدید می‌باشد. به طور کلی در آزمایشات انجام شده، فواصل طولی و عرضی مختلفی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است اما بر اساس مشاهدات انجام گرفته با بکارگیری فواصل طولی و عرضی ۱۲۰ میلی‌متر تعداد موانع کمتری و در طول کوتاهتری از بازه مانع گذاری شده پدیده تشدید و مشاهده امواج رخ داده است. لذا در تحقیق حاضر فواصل طولی و عرضی مذکور مورد استفاده قرار گرفته است. آرایش موازی موانع و فواصل طولی و عرضی آنها در شکل ۲ و نمونه‌ای از قرارگیری موانع در فلوم آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- آرایش موازی موانع.



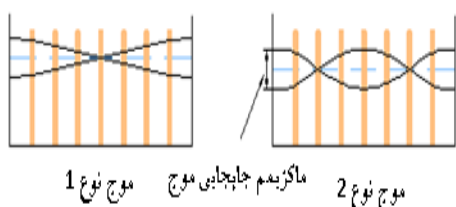
شکل ۳- نمونه‌ای از نحوه قرارگیری موانع در فلوم.

از ابتدای مخزن آرام کننده تا فاصله یک متری از ابتدای دیوار جدا کننده کف فلوم توسط ذرات سیلیس ریز (دانسیته ۲/۶۵) با قطر متوسط ۰/۱۲ میلی‌متر به ضخامت ۳۰ میلی‌متر پوشانده شده است.

مورد استفاده در مسیر جریان استوانه‌های چوبی به قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بوده است. معلق شدن ذرات رسوبی و عدم حرکت ذرات به صورت بار شسته و همچنین همپوشانی بهتر گرداب‌های تشکیل شده متناسب با عرض فلوم آزمایشگاهی را می‌توان از مزایای بکار بردن موانع مذکور در تحقیق انجام شده ذکر کرد. جهت بررسی تأثیر دبی جریان بر غلظت رسوبات معلق، آزمایشات با سه دبی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه انجام شده است. زیرا بر اساس آزمایشات انجام گرفته حداقل دبی جهت ایجاد عمق مطلوب در فلوم آزمایشگاهی که اثر کف بر شرایط هیدرولیکی جریان مشاهده نشود، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه بوده است و حداکثر دبی مورد استفاده با توجه به شرایط پمپ موجود و فلوم آزمایشگاهی ۳۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد. جریان آب خروجی از فلوم پس از تخلیه در حوضچه کوچک موجود در پایین دست فلوم، به حوضچه بزرگتری که در انتهای آن سرریز مثلثی ۵۳ درجه جهت تنظیم دبی عبوری ساخته شده است، هدایت گردیده و با قرائت ارتفاع آب روی سرریز و با استفاده از رابطه دبی اشل مربوط به سرریز مثلثی موجود، دبی مورد نظر تنظیم شده است. به منظور استهلاک انرژی جریان ورودی، یک آرام کننده در ابتدای فلوم و جهت کنترل عمق و سرعت جریان از یک دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده شده است. در هر آزمایش ارتفاع دریچه کشویی از یک مقدار حداکثر (متناسب با عمق جریانی که امواج عرضی شکل می‌گیرند) تا ارتفاع صفر با گام های ۵ میلی‌متر تغییر کرده است. برای انجام این تحقیق از فاصله ۴ متری از انتهای فلوم، عرض فلوم توسط یک دیوار جداکننده به طول ۴ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر به دو قسمت مساوی تقسیم شده است.

به منظور تثبیت موانع استوانه‌ای در مسیر جریان، از صفحات پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است که تمام سطح این صفحات با فواصل طولی و عرضی ۳۰ میلی‌متر، شبکه‌بندی و سپس رزوه شده است تا بتوان موانع استوانه‌ای را روی آنها پیچ نمود. سپس این صفحات در کف فلوم آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند و بر روی این صفحات، موانع

عرضی در فلوم آزمایشگاهی تشکیل شده است. این امواج با حداکثر دامنه، زمانی شکل می‌گیرند که بسامد نیروی ناشی از گرداب موانع با یکی از بسامدهای طبیعی نوسان آب در حالت دو سر باز برابر شود و تشدید صورت پذیرد. در این حالت تعداد صحیحی از گره‌ها در عرض فلوم جا می‌گیرند که تعداد آنها، همان نوع موج می‌باشد. این ۲ نوع موج با حرف π و شماره-های ۱ و ۲ شماره گذاری می‌شوند. در شکل ۴ این دو نوع موج نشان داده شده‌اند.



شکل ۴- انواع امواج عرضی در فلوم آزمایشگاهی.

برای نشان دادن شرایط هیدرولیکی جریان در حالت حداکثر دامنه، به عنوان نمونه تغییرات دامنه موج در مقابل عمق جریان برای آزمایش ۲ و تغییرات دامنه بی‌بعد امواج نسبت به تغییرات عمق در این آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ رسم شده است. مطابق شکل ۵ در آزمایش شماره ۲، حداکثر دامنه موج نوع ۱، $30/3$ میلی‌متر در عمق جریان $16/7$ سانتی‌متر و حداکثر دامنه موج نوع ۲، $26/3$ میلی‌متر در عمق جریان $11/6$ سانتی-متر اتفاق افتاده است و شکل ۶ نشان می‌دهد که حداکثر دامنه مشاهده شده در آزمایش شماره ۲، برای موج نوع ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۱۸ و ۲۳ درصد عمق متوسط جریان می‌باشد. بر اساس جدول ۱، بیشترین دامنه موج مشاهده شده در آزمایش‌ها، ۲۵ درصد عمق متوسط جریان می‌باشد که در آزمایش شماره ۳ تشکیل شده است.

پس از ثبت مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایطی که موج عرضی با حداکثر دامنه تشکیل می‌شود، در این مرحله غلظت رسوبات معلق در سه عمق $0/2h$ ، $0/6h$ و $0/8h$ در ۳ مقطع در بالادست بازه موانع و

هر یک از آزمایشات این تحقیق در طی دو مرحله صورت گرفته است، در مرحله اول پس از ایجاد آرایش مورد نظر موانع و تنظیم دبی، با تغییر ارتفاع دریچه کشویی (گام ۵ میلی‌متر در هر مرحله) و تغییر شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایطی که موج عرضی با حداکثر دامنه تشکیل می‌شود ثبت شده است. در این شرایط دامنه امواج (به صورت حداکثر و حداقل عمق جریان روی دیواره فلوم) و عمق جریان توسط خطکش‌هایی که در ۳ مقطع متفاوت با فواصل یکسان از یکدیگر در طول بازه مانع گذاری شده قرار داده شده‌اند، اندازه‌گیری شده است و متوسط دامنه‌ها و عمق‌های قرائت شده به عنوان دامنه هر موج تشکیل شده و متوسط عمق جریان ارائه شده است و نوع موج مشاهده شده نیز ثبت شده است. در جدول ۱ مشخصات کلی آزمایشات صورت گرفته در تحقیق حاضر و همچنین مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایط تشکیل موج عرضی با حداکثر دامنه ارائه شده است. در ستون ۱ از جدول ۱ شماره آزمایش‌ها مشخص شده است. در ستون ۲ فاصله بین استوانه‌های متوالی در هر ردیف، در ستون ۳ فاصله بین ردیف‌های موانع، در ستون ۴ دبی جریان، در ستون ۵ تراکم موانع (میانگین مجموع موانع در دو ردیف متوالی)، در ستون ۶ تعداد ردیف‌های موانع، در ستون ۷ آرایش موانع، در ستون ۸ نوع موج، در ستون ۹ عمق جریان بالادست فلوم، در ستون ۱۰ متوسط دامنه موج تشکیل شده در بازه مانع گذاری (از میانگین دامنه‌های قرائت شده در ۳ مقطع بازه مانع گذاری شده مشخص شده است) نشان داده شده است. در ستون ۱۱ دامنه بی‌بعد امواج نسبت به عمق جریان ارائه شده است و در ستون‌های ۱۲، ۱۳ به ترتیب متوسط عمق جریان در بازه موانع (از میانگین عمق‌های قرائت شده در ۳ مقطع بازه مانع گذاری شده مشخص شده است) و متوسط عمق جریان در بازه بدون موانع نشان داده شده است. در ستون ۱۴ و ۱۵ به ترتیب عمق جریان پایین دست بازه موانع و بدون موانع نشان داده شده است.

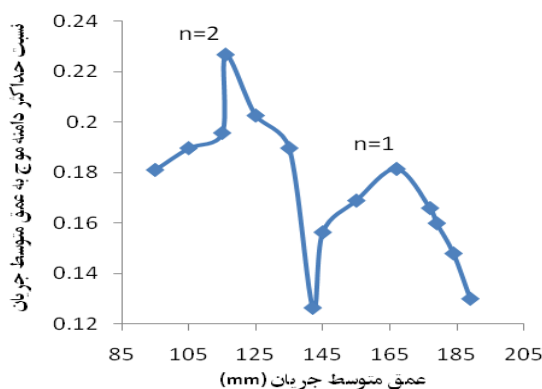
همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در آزمایشات انجام شده در تحقیق حاضر، دو نوع موج

کدورت جریان را به غلظت بر حسب واحد گرم بر لیتر تبدیل کرد. در شکل ۷ مقاطع مورد استفاده در فلوم آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق در همه آزمایشات انجام شده در این تحقیق نشان داده شده است.

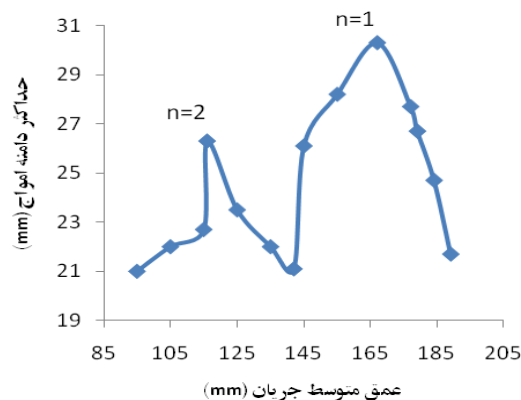
به طور متقابل در بالادست بازه بدون موانع و همچنین در ۱ مقطع در پایین‌دست بازه موانع و به طور متقابل در بازه بدون موانع، توسط دستگاه کدورت سنج اندازه‌گیری شده است. این دستگاه مقادیر کدورت جریان را بر حسب واحد NTU اندازه‌گیری می‌کند و بر اساس منحنی کالیبراسیون دستگاه می‌توان مقادیر

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایشات و مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایط تشکیل موج عرضی با حداکثر دامنه.

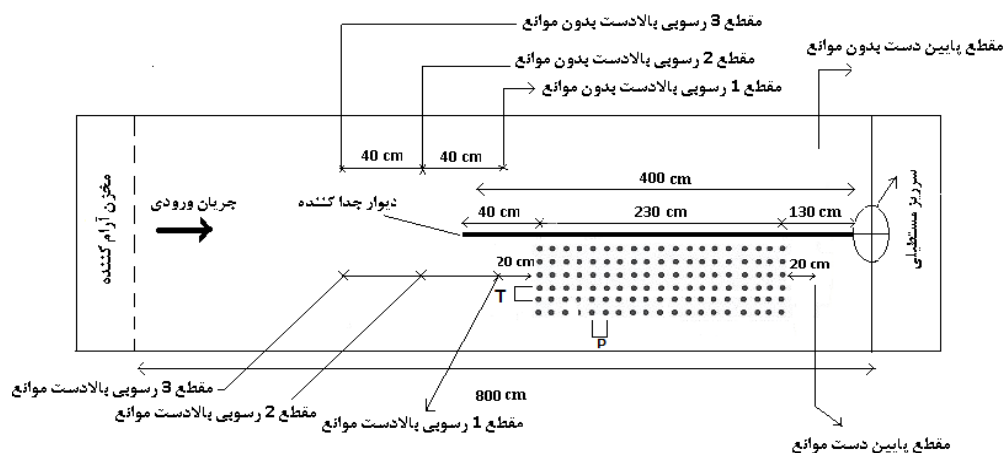
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
شماره آزمایش	T (mm)	P (mm)	Q (L/s)	N	L	آرایش موانع	n	h_u (cm)	$A_{average}$ (mm)	A/h	h_{av1} (cm)	h_{av2} (cm)	h_d (cm)	h'_d (cm)
							...	۱۸/۳	....	....	۱۷/۲	۱۷/۸	۱۶/۵	۱۷/۵
۱	۱۲۰	۱۲۰	۲۵	۴	۲۰	موازی	۱	۱۵/۳	۳۱	۰/۲۰	۱۳/۷	۱۴/۷	۱۲/۸	۱۴/۲
							۲	۱۰/۲	۲۱/۷	۰/۲۱	۸/۶	۹/۴	۷/۵	۸/۶
							...	۱۹/۳	....	....	۱۸/۱	۱۸/۹	۱۷/۴	۱۸/۵
۲	۱۲۰	۱۲۰	۳۰	۴	۲۰	موازی	۱	۱۶/۷	۳۰/۳	۰/۱۸	۱۵/۷	۱۶/۴	۱۵/۲	۱۶/۲
							۲	۱۱/۶	۲۶/۳	۰/۲۳	۱۰/۴	۱۱	۹/۲	۱۰/۴
							...	۲۴/۹	....	....	۲۳/۲	۲۴/۱	۲۲/۵	۲۳/۶
۳	۱۲۰	۱۲۰	۲۵	۴	۲۰	موازی	۱	۲۰	۵۰	۰/۲۵	۱۸/۷	۱۹/۵	۱۸	۱۹
							۲	۱۳/۱	۲۷	۰/۲۱	۱۱/۸	۱۲/۶	۱۰/۸	۱۲/۱



شکل ۶- تغییرات دامنه بدون بعد امواج در مقابل تغییرات عمق.



شکل ۵- تغییرات دامنه امواج در مقابل تغییرات عمق.



شکل ۷- نمایی شماتیک از محل قرارگیری دیوار جدا کننده و مقاطع اندازه گیری غلظت رسوبات معلق در فلوم.

رابطه فوق حذف می شود. همچنین رابطه بین نوع موج

$$n = \frac{2b}{\lambda} \quad (n) \text{ با طول موج و عرض فلوم به صورت}$$

می باشد. لذا تأثیر پارامتر بدون بعد $\frac{b}{\lambda}$ در پارامتر نوع موج (n) وجود داشته و این پارامتر نیز از رابطه فوق خارج می گردد. از طرفی با صرف نظر کردن سایر پارامترهای ثابت در آزمایشات انجام گرفته از قبیل N, T, P, D و Pa و همچنین در نظر گرفتن پارامترهایی از موج عرضی که دبی بر آنها تأثیرگذار می باشد، رابطه ۳ در نهایت حاصل شده است.

$$\frac{A}{h} = \phi_2 \left(\frac{Q}{UD^2}, n \right) = 0 \quad [3]$$

رابطه بین دو پارامتر بدون بعد فوق در نرم افزار SPSS و با انجام تحلیل های آماری برای موج های نوع ۱ و ۲ به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته شده است و رابطه ۴ برای موج نوع ۱ ارائه شده است. اما برای موج نوع ۲ به دلیل عدم مناسب بودن ضریب همبستگی، رابطه ای قابل ذکر نبوده است.

$$\frac{A}{h} = 0.008 \left(\frac{Q}{UD^2} \right)^{0.691} \quad [4]$$

در مرحله دوم هر یک از آزمایشات، ارتفاع دریچه کشویی تا جایی بالا آورده شده است که موج عرضی موجود کاملاً حذف شود و غلظت رسوبات معلق مشابه مرحله قبل اندازه گیری شده است. در جدول های ۲، ۳ و ۴ مقادیر کدورت جریان و غلظت رسوبات معلق اندازه گیری شده، ارائه شده است.

به منظور بررسی تأثیر دبی بر روی مشخصات امواج عرضی و تعیین روابط بین دبی و سایر متغیرها، از روش تحلیل ابعادی استفاده گردیده و روابط زیر در نظر گرفته شده است.

$$\phi(A, h, Q, N, n, f_s, f, b, \lambda, \mu, \rho, g, U, T, P, N, D, Pa) = 0 \quad [1]$$

$$\phi \left(\frac{A}{h}, \frac{f_s D}{U}, \frac{UD\rho}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gh}}, \frac{f_s}{f}, \frac{b}{\lambda}, \frac{Q}{UD^2}, n, \frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N, Pa \right) = 0 \quad [2]$$

در روابط فوق، Pa = آرایش قرارگیری موانع استوانه ای،

λ = طول موج، f_s = فرکانس نیروی تناوبی ناشی از

گرداب موانع و f = فرکانس موج عرضی می باشند. با

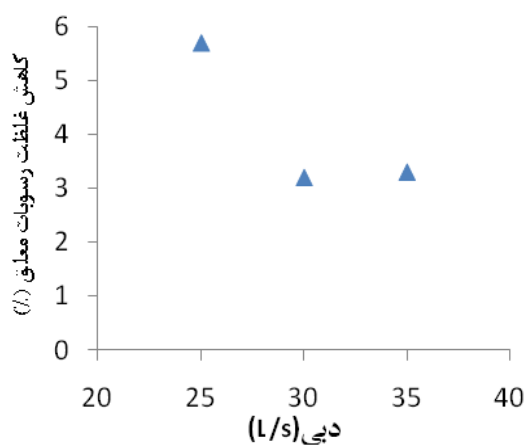
توجه به اینکه امواج عرضی با حداکثر دامنه، در حالتی تشکیل می شوند که تشدید به وجود آمده و فرکانس نیروی تناوبی ناشی از گرداب موانع با فرکانس موج

عرضی برابر گردد، بنابراین در این حالت، $\frac{f_s}{f} = 1$ و از

نتایج و بحث

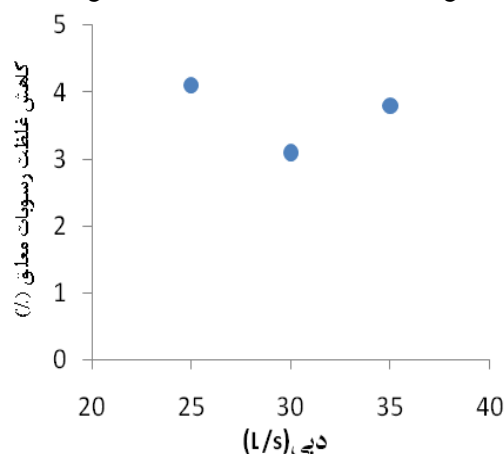
علت این امر این است که چون چگالی آب از چگالی ذرات رسوب معلق کمتر می‌باشد، خطوط جریان بیشتر از رسوبات به بازه بدون موانع که سرعت جریان بیشتر از بازه موانع می‌باشد منحرف می‌شوند. بنابراین غلظت رسوبات معلق در بازه موانع بیشتر از بازه بدون موانع در شرایطی که در فلوم موج عرضی وجود نداشته باشد، خواهد بود. با تشکیل امواج عرضی در فلوم رسوبات موجود در بازه موانع به پایین‌دست منتقل نشده و در اثر موج، رسوبات به بالادست این بازه انتقال داده می‌شوند و در آنجا ته‌نشین شده و یا به بازه بدون موانع منتقل خواهند شد.

به منظور بررسی تأثیر دبی در شرایط وجود موج عرضی بر غلظت رسوبات معلق پایین‌دست موانع، نمودار تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق انتهایی دو سمت دیوار جدا کننده (پایین‌دست بازه موانع نسبت به پایین‌دست بازه بدون موانع) در شرایط وجود موج عرضی در مقابل تغییرات دبی برای آزمایشات انجام گرفته در تحقیق حاضر برای موج نوع ۱ در شکل ۸ (الف) و برای موج نوع ۲ در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است.



(ب) موج نوع ۲

به طور کلی با کاهش ارتفاع دریچه کشویی، موج نوع ۱ با دامنه کم شروع به نوسان می‌کند، با کاهش بیشتر عمق، دامنه موج بیشتر می‌شود تا اینکه به یک مقدار حداکثر، در حالت تشدید، می‌رسد. با کاهش مجدد عمق، دامنه موج به تدریج کاهش می‌یابد، تا اینکه موج نوع ۱ به طور کامل محو می‌شود. با کاهش بیشتر عمق به تدریج موج نوع ۲ تشکیل می‌شود، این نوع موج هم پس از رسیدن به یک دامنه نوسان حداکثر، در کاهش‌های بعدی عمق از بین می‌رود. نتایج نشان می‌دهند که در آزمایشات مرحله اول یعنی در حالتی که موج عرضی با حداکثر دامنه در فلوم آزمایشگاهی تشکیل شده است، غلظت رسوبات معلق در انتهای دیوار جدا کننده در بازه موانع کمتر از بازه بدون موانع شده است. به گونه‌ای که برای موج نوع ۱ و ۲ به طور متوسط درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع به ترتیب حدود $3/6$ و $4/5$ درصد بوده است. در آزمایشات مرحله دوم یعنی در حالتی که موج عرضی در فلوم کاملاً از بین رفته است، عکس وضعیت قبلی اتفاق افتاده است و غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع بیشتر از انتهای بازه بدون موانع می‌باشد.



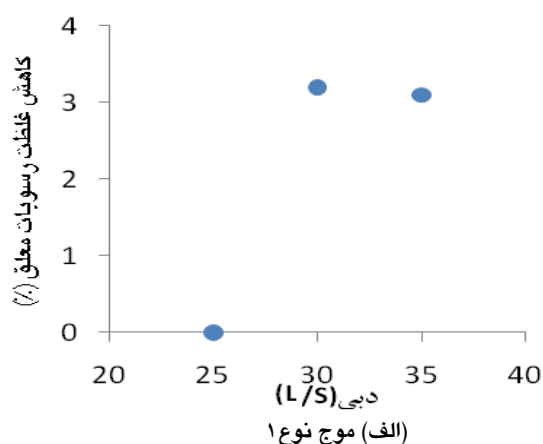
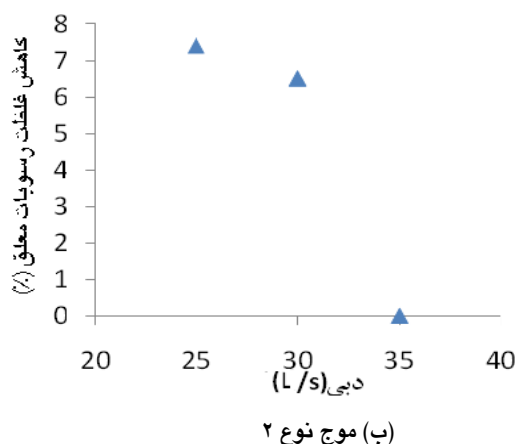
(الف) موج نوع ۱

شکل ۸- تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق پایین‌دست بازه موانع نسبت به پایین‌دست بازه بدون موانع در مقابل تغییرات دبی.

بازه موانع تأثیر دارد و باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بازه بدون

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، امواج عرضی بر انتقال رسوبات معلق به سمت پایین‌دست

بطور کلی علت کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست موانع نسبت به پایین دست بازه بدون موانع در شرایط تشکیل موج با حداکثر دامنه، کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست بازه موانع به سمت پایین دست بازه موانع در اثر وجود موج می باشد. این پدیده انتقال رسوبات معلق به سمت بالادست بازه موانع در اثر تشکیل موج با حداکثر دامنه و ته نشین شدن ذرات در بالادست این بازه و یا انتقال رسوبات مذکور به بازه بدون موانع را به همراه خواهد داشت. به منظور بررسی تاثیر دبی بر غلظت رسوبات معلق بالادست فلوم در شرایط وجود موج عرضی نسبت به شرایطی که موج عرضی در فلوم شکل نگرفته است، تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به سمت پایین دست بازه موانع در شرایط وجود موج عرضی با حداکثر دامنه نسبت به شرایط عدم وجود موج در فلوم برای موج نوع ۱ در شکل ۹ (الف) و برای موج نوع ۲ در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است.



شکل ۹- تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه موانع در مقابل تغییرات دبی.

جدول ۱ قابل مشاهده است با افزایش دبی، دامنه موج نوع ۱ از ۲۱ میلی متر به ۵۰ میلی متر افزایش یافته است. از طرفی امواج بر اساس نسبت عمق جریان به طول موج (طول موج نوع ۱ برابر با عرض بازه موانع یعنی ۵۰ سانتی متر و طول موج نوع ۲ نصف طول موج نوع ۱ یعنی ۲۵ سانتی متر می باشد) به ۳ دسته امواج آب عمیق

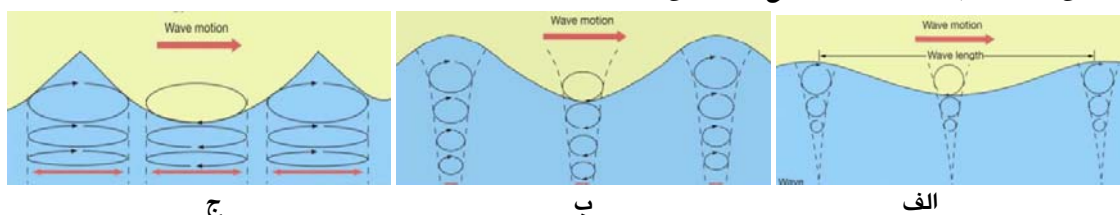
موانع شده است اما با افزایش دبی تغییر محسوسی بر درصد غلظت کاهش یافته مشاهده نشده است. زیرا بر اساس نتایج مشاهده شده در شکل های ۹ و ۱۰، برای موج نوع ۱ با افزایش دبی درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده در بازه موانع افزایش یافته است اما از طرفی درصد افزایش رسوبات منتقل شده به بازه بدون موانع کاهش یافته است. لذا اختلاف غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع تغییر محسوسی نکرده است. همچنین برای موج نوع ۲ با افزایش دبی درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده در بازه موانع کاهش یافته است اما از طرفی درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده به بازه بدون موانع افزایش یافته است لذا اختلاف غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع تغییر محسوسی نکرده است. می توان این گونه بیان کرد که در محدوده دبی های انجام شده برای موج نوع ۱ و ۲ بطور متوسط درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بدون موانع به ترتیب حدود ۳/۶ و ۴/۵ درصد بوده است.

همان طور که شکل ۹ (الف) نشان می دهد، برای موج نوع ۱ با افزایش دبی، درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه موانع افزایش یافته است. دلیل این امر این است که با افزایش دامنه، توانایی موج در کاهش غلظت رسوبات معلق پایین دست موانع افزایش می یابد و همان گونه که در

و از طرفی با افزایش دبی، عمق جریان افزایش می‌یابد. بنابراین تأثیر موج بر عمق‌های زیرین جریان کاهش بیشتری خواهد داشت لذا درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده کاهش یافته است. به خصوص مشاهده شده است که به دلیل افزایش عمق آب (حدود ۳ سانتی‌متر) در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه تأثیری بر کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده در بازه موانع نداشته است.

بنابراین بر اساس توضیحات فوق، تأثیر موج نوع ۱ در عمق، بیشتر از نوع ۲ است که این مسئله 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 منتقل شده در بازه موانع گردد.

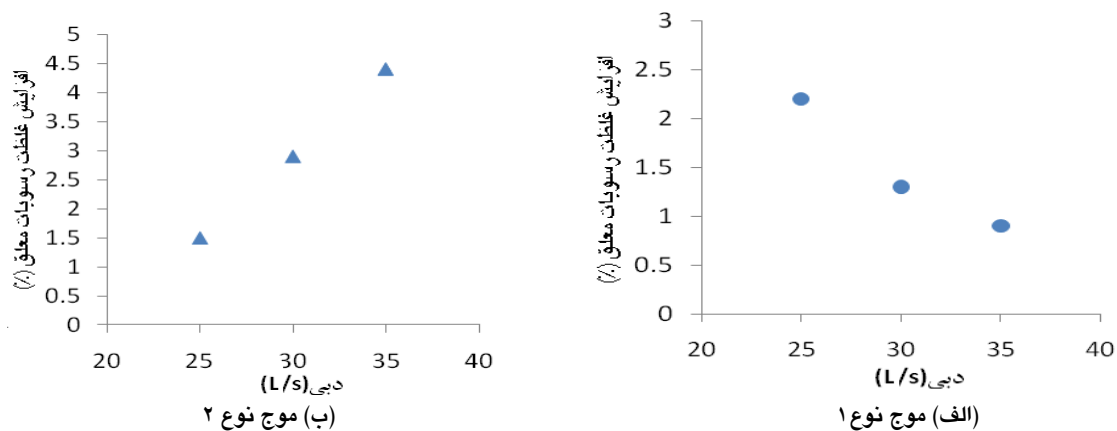
($h/\lambda > 0.5$)، کم عمق ($h/\lambda < 0.05$) و بینابین ($0.05 < h/\lambda < 0.5$) طبقه‌بندی می‌شوند. در امواج آب عمیق فقط لایه سطحی جریان آب بر اثر حرکت موج متأثر می‌گردد، در صورتی که در امواج آب کم عمق، همه عمق جریان آب با حرکت موج تحت تأثیر قرار می‌گیرد (شکل ۱۰). بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق و محاسبه h/λ ، تقریباً موج نوع ۱ در دسته امواج بینابین قرار دارد و لذا همه عمق جریان آب با حرکت موج تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین توانایی موج نوع ۱ در کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده و پس زدن رسوبات به بالادست بازه موانع افزایش یافته است. اما همان طور که در شکل ۹ (ب) مشاهده می‌شود، برای موج نوع ۲ با افزایش دبی، درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه موانع کاهش یافته است. زیرا موج نوع ۲ در دسته امواج عمیق قرار دارد و فقط لایه سطحی جریان آب بر اثر حرکت موج متأثر می‌گردد



شکل ۱۰- الف: امواج عمیق، ب: امواج بینابین، ج: امواج کم عمق.

بازه بدون موانع در دبی‌های متفاوت نسبت به شرایطی که موج عرضی در فلوم شکل نگرفته است، تغییرات درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به سمت پایین دست بازه بدون موانع در شرایط وجود موج عرضی با حداکثر دامنه نسبت به شرایط عدم وجود موج در فلوم برای موج نوع ۱ در شکل ۱۱ (الف) و برای موج نوع ۲ در شکل ۱۱ (ب) نشان داده شده است.

همچنین در این تحقیق تأثیر امواج نوع ۱ و ۲ بر انتقال رسوبات معلق به سمت بازه بدون مانع نسبت به شرایطی که موج در فلوم وجود ندارد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که در دبی‌های ۲۵، ۳۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه، غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به سمت پایین دست بازه بدون موانع تحت اثر موج‌های نوع ۱ و ۲، نسبت به شرایط عدم وجود موج در فلوم افزایش یافته است. به منظور بررسی تأثیر موج نوع ۱ و ۲ بر غلظت رسوبات معلق منتقل شده از



شکل ۱۱- تغییرات درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بازه بدون موانع در مقابل تغییرات دبی.

رسوبات معلق به سمت بالادست موانع بیشتر از موج نوع ۲ می باشد لذا رسوبات معلق پس زده شده، در بالادست بازه موانع ته نشین کرده و یا به سمت بالادست فلوم منتقل می کند و کمتر به بازه بدون موانع منتقل خواهد کرد. چون با افزایش دبی دامنه موج نوع ۱ افزایش قابل توجهی داشته است، بنابراین توانایی آن در پس زدن رسوبات معلق به سمت بالادست فلوم در فاصله دورتری از دیوار جدا کننده افزایش یافته است. بنابراین این امر علت کاهش درصد غلظت رسوبات معلق عبوری از بازه بدون موانع تحت اثر موج نوع ۱ با افزایش دبی می باشد. اما موج نوع ۲ به دلیل اینکه قادر به پس زدن رسوبات به سمت بالادست فلوم نمی باشد لذا بخشی از رسوبات معلق که از بالادست فلوم به سمت دیواره جدا کننده نزدیک می شوند را به بازه بدون موانع منحرف می کند. این پدیده علت افزایش درصد غلظت رسوبات معلق عبوری از بازه بدون موانع تحت اثر موج نوع ۲ می باشد و با افزایش دبی به دلیل افزایش سرعت جریان عبوری از بازه بدون موانع توانایی آن در انتقال رسوبات معلق به همراه خطوط جریان منحرف شده به بازه بدون موانع افزایش یافته است.

تاکنون تحقیقی در زمینه بررسی تأثیر دبی بر غلظت رسوبات معلق در بالادست و پایین دست موانع در شرایط وجود امواج عرضی صورت نگرفته است. از جمله تحقیقاتی که پیرامون غلظت رسوبات معلق در پایین دست موانع انجام شده است، می توان به تحقیقات طاهریان و همکاران (۱۳۹۱) اشاره نمود. آنها به بررسی

همان گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، برای موج نوع ۱ با افزایش دبی، درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه بدون موانع کاهش یافته است. به گونه ای که در دبی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه مذکور در شرایط وجود موج نوع ۱ نسبت به شرایطی که موجی در فلوم تشکیل نشده است، به ترتیب ۲/۲، ۱/۳ و ۰/۹ درصد می باشد. اما برای موج نوع ۲ با افزایش دبی، درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه بدون موانع افزایش یافته است. به گونه ای که در دبی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین دست بازه مذکور در شرایط وجود موج نوع ۲ نسبت به شرایطی که موجی در فلوم تشکیل نشده است، به ترتیب ۱/۵، ۲/۹ و ۴/۴ درصد می باشد. زیرا همان گونه که در ابتدای بخش نتایج و بحث بیان گردید، در شرایطی که در فلوم موج عرضی وجود نداشته باشد، خطوط جریان بیشتر از رسوبات به بازه بدون موانع که سرعت جریان بیشتر از بازه موانع می باشد منحرف می شوند چون چگالی آب از چگالی ذرات رسوب کمتر می باشد، بنابراین غلظت رسوبات معلق در بازه موانع بیشتر از بازه بدون موانع خواهد بود. در حالی که با تشکیل امواج عرضی در فلوم رسوبات کمتری از بالادست به پایین دست بازه موانع منتقل خواهد شد و از آنجا که توانایی موج نوع ۱ در پس زدن

به بازه بدون موانع، باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع می‌گردد.

همان‌گونه که نتایج این تحقیق در ۳ آزمایش انجام گرفته نشان می‌دهد، با ثابت نگه داشتن قطر و فاصله طولی و عرضی موانع، برای موج نوع ۱ و ۲ هر چه دبی افزایش یابد اختلاف غلظت رسوبات معلق انتهای دو سمت دیوار جدا کننده کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داده است که هر چه دبی افزایش یابد، درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به سمت پایین‌دست بازه موانع در شرایط وجود موج نوع ۱ با حداکثر دامنه نسبت به شرایط عدم وجود موج افزایش یافته است. به گونه‌ای که برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه تغییری نداشته است، اما برای دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه به ۳ درصد افزایش یافته است. در شرایط وجود موج نوع ۲ با حداکثر دامنه نسبت به شرایط عدم وجود موج، با افزایش دبی درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به سمت پایین‌دست بازه موانع کاهش یافته است. به گونه‌ای که برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه حدود ۷/۴ درصد می‌باشد اما برای دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه تغییری نداشته است. نتایج حاصل از بررسی میزان رسوبات معلق منتقل شده از بازه بدون موانع در شرایط وجود موج نسبت به شرایط عدم وجود موج دلالت بر این امر دارد که با افزایش دبی برای موج نوع ۱، درصد افزایش غلظت رسوبات معلق منتقل شده از بالادست به پایین‌دست بازه بدون موانع نسبت به شرایط عدم وجود موج در فلو، کاهش یافته است اما برای موج نوع ۲ عکس این قضیه اتفاق افتاده است و افزایش یافته است.

تأثیر قطر موانع در شرایط وجود موج عرضی ناشی از گرداب موانع بر غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع پرداخته‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است که در حالت عدم وجود موج عرضی، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع بیشتر از انتهای بازه بدون موانع است. اما تحت اثر تشکیل این امواج عکس این وضعیت اتفاق می‌افتد و غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع کمتر از بازه بدون موانع خواهد شد. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج این محققین نیز این حقیقت را نشان داده است. علاوه بر آن تأثیر دبی بر درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع نیز بررسی شده است. همچنین در این تحقیق سعی شده است که میزان درصد کاهش غلظت رسوبات معلق منتقل شده در بازه موانع تحت اثر امواج عرضی و تأثیر دبی بر غلظت بالادست موانع مورد بررسی قرار گرفته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در آزمایشات انجام گرفته مشاهده گردید در حالت وجود موج عرضی ناشی از موانع، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع کمتر از انتهای بدون موانع است به گونه‌ای که برای موج نوع ۱ و ۲ به طور متوسط درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بدون موانع به ترتیب حدود ۲/۶ و ۴/۵ درصد بوده است. در حالی که در شرایط عدم وجود موج عرضی عکس این قضیه اتفاق می‌افتد. از مقایسه تغییر غلظت رسوبات معلق در انتهای دو سمت دیوار جدا کننده برای آزمایشات مرحله اول و دوم می‌توان نتیجه گرفت که امواج عرضی بر انتقال رسوبات معلق به سمت پایین‌دست موانع تأثیر دارد و کاهش انتقال رسوبات معلق در بازه موانع و انتقال آنها

منابع مورد استفاده

طاهریان ف، قمشی م و پوستی‌زاده ن، ۱۳۹۱. بررسی تأثیر قطر موانع در شرایط وجود موج عمود بر جریان ناشی از گرداب موانع بر غلظت رسوبات معلق. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران. عزیزی ر و قمشی م، ۱۳۸۹. رابطه فرکانس امواج عمود بر جریان در مجاری روباز با مشخصات جریان و موانع. مجله علمی- پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۶، جلد دوم، صفحه‌های ۵۷ تا ۶۵.

- 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 گرداب موانع در مجاری روباز و تأثیر آن بر شکل بستر. مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بیست و چهارم بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- Blevins RD, 1977. Flow-induced Vibration. VNR, London, England.
- Crass, 1939. About Oscillation Phenomenon on Water Surface. part 1: Flow Around Obstacle from Piles of Bridg, 209, Pitman Publishing, London.
- Fitz-hugh JS, 1973. Flow induced vibration in heat exchangers. proc. UKAEA/NPL International Symposium on vibration problems in industry, Keswick, England, 427: 1-17.
- Ghomeshi M, Mortazavi-Dorcheh SA and Falconer R, 2007. Wave formation by Vortex shedding in open channel, Journal of Applied Sciences 7 (24):3927-3934.
- Jafari A, Ghomeshi M, Bina M and Kashefipour SM, 2010. Comparing of ten modes of oscillation occurring across the open channels. IAHR-APD Congress, 21 - 24 February, The School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- Zima L and Ackermann SN, 2002. Wave Generation in open channels by vortex shedding from channel obstruction. Journal of Hydraulic Engineering 128(6):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, U.S.A.