

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر امواج عمود بر جریان بر غلظت رسوبات معلق در پایین دست موانع با آرایش زیگزاگی

ندا پوستی زاده^{1*}، مهدی قمشی²

تاریخ دریافت: 93/11/29 تاریخ پذیرش: 94/11/12

¹ فارغ‌التحصیل دکتری سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران، اهواز

² استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

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

چکیده

بر اثر جریان سیال پیرامون مجموعه‌ای از موانع که در مسیر جریان قرار گرفته‌اند و در نتیجه هم‌پوشانی لایه‌های برشی و گرداب، امواج عرضی تشکیل می‌شود. در این تحقیق پدیده تشکیل امواج عرضی و تأثیر آن‌ها بر غلظت رسوبات معلق در یک فلوم مستطیلی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در حالت عدم وجود موج، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع برابر یا بیشتر از انتهای بازه بدون مانع هست. امواج عرضی با کاهش انتقال رسوبات در بازه موانع، باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع می‌گردند و موج نوع 1 بیشترین تأثیر را داشته است. به‌گونه‌ای که بیشینه میزان کاهش نسبت به شرایط بدون موج برای ذرات با قطر متوسط 0/12 میلی‌متر در شرایط وجود موج نوع 1 و 2 به ترتیب حدود 12/5 و 8/3 درصد و برای ذرات با قطر متوسط 0/35 میلی‌متر حدود 8/6 و 3/7 مشاهده شده است. لذا پس از انجام تحلیل ابعادی و انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS پارامترهای بدون بعد مؤثر بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع تحت اثر امواج عمود بر جریان برای هر دانه‌بندی به‌طور جداگانه مشخص شد و تأثیر هر یک از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت رابطه‌ای کلی جهت محاسبه درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع با آرایش زیگزاگی تحت اثر امواج عرضی در کانال‌های رویاز برای هر دو نوع دانه‌بندی به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: آرایش زیگزاگی، غلظت رسوبات معلق، گرداب، موانع، موج عرضی

Experimental Study on the Effect of Transverse Waves on Suspended Sediment Concentration at Downstream of Obstacles in a Staggered Arrangement

N Poustizadeh¹, M Ghomeshi²

Accepted: 18 February 2015

Received: 01 February 2016

¹ Ph.D. Graduate, Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran (SCU), Ahvaz, Iran

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

* Corresponding Author, Email: nedapzh@gmail.com

Abstract

Consequence of the fluid flow passes through a set of obstacles of cylinders, the overlap of shear layers and vortex result in formation of transverse waves. The present study focused on the formation of transverse waves and their effect on suspended sediment concentration based on laboratory tests in a rectangular flume. The results showed that the concentration of suspended sediment at downstream of obstacles zone was equal or more than that at the downstream of no obstacle zone in the no wave condition. Transverse waves decreased the transportation of suspended sediment at the downstream of obstacles zone and the wave mode 1 had the most effect on this phenomenon. According to the findings, for the wave modes 1 and 2 the maximum reductions in the concentration of suspended sediments with an average diameter of 0.12 mm at downstream of obstacles zone in comparison to no obstacles zone were about 12.5% and 8.3% and these reductions for sediment with an average diameter of 0.35 mm were about 8.6% and 3.7%, respectively. Therefore, with the aids of dimensional analysis, dimensionless parameters effects on sediment transportation of each grain size were determined. Finally, by using statical analysis a relationship was proposed to estimate the rate of suspended sediment concentration reduction at obstacles zone in a staggered arrangement for each grain size when transverse wave occurred in open channel.

Keywords: Obstacles, Staggered arrangement, Suspended sediment concentration, Transverse wave, Vortex

مقدمه

سیال داخل لایه مرزی می‌شوند و اگر هر دو در مسافت قابل توجهی به سیال اثر کنند، سبب می‌شوند که لایه مرزی به سکون برسد. این پدیده، جدایی² نامیده می‌شود. در نقطه جدایی، خط جریان از مرز جدا می‌شود. در پایین دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله³ و گرداب⁴ به وجود می‌آید (انتظاری 1381، ناداسچر و راکول 1979).

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 سکون¹ افزایش می‌یابد. با افزایش فشار در امتداد جریان، لایه مرزی به سرعت ضخیم می‌شود. گردان فشار مثبت و تنش برشی مرز باعث کاهش مومنتوم

² Separation

³ Wake

⁴ Vortex

¹ Stagnation point

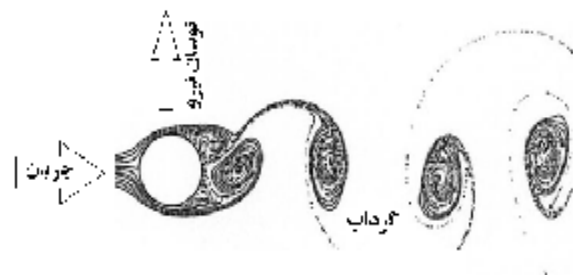
کرده‌اند. قمشی و همکاران (2007) در تحقیق دیگری آزمایش‌های خود را با استفاده از موانعی به قطر 24 میلی‌متر در آب انجام دادند و توانستند امواج نوع 1، 2، 3 و 4 را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمایند و روابطی را برای محاسبه دامنه و فرکانس امواج پیشنهاد کرده‌اند. جعفری و همکاران (2010) در تحقیق خود رابطه‌ای جهت محاسبه دامنه نسبی بیشینه امواج عرضی و محاسبه عدد استروهمال مربوط به مجموعه‌ای از موانع که در مسیر جریان قرار دارند ارائه کرده‌اند.

در زمینه تأثیر امواج عرضی بر انتقال رسوبات در مجاری روباز تاکنون تحقیقات زیادی انجام نشده است. عزیزی و قمشی (1389) دو رابطه برای تعیین فرکانس امواج حاصل از پدیده ارتعاش ناشی از گرداب در مجاری روباز ارائه کرده‌اند. در تحقیق دیگری قمشی (1388) 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 70 سانتی‌متری موانع، برای برخی مصالح تشکیل فرم بستر ریل مشاهده می‌شود و برای مصالح بسیار ریز کاهش حجم مصالح و معلق شدن آن‌ها را اظهار داشته است. تاکنون در میان مطالعات صورت گرفته، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی میزان کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع ارائه نشده است. با توجه به اینکه مسئله فرسایش، آبشستگی و انتقال رسوبات در مجاری روباز همواره از مسائل مورد توجه بوده است، لذا هدف از این تحقیق بررسی تأثیر این امواج بر انتقال رسوبات معلق و تعیین رابطه‌ای جهت پیش‌بینی میزان کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع با آرایش زیگزاگی هست.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک فلوم آزمایشگاهی به طول 8 متر، عرض 100 سانتی‌متر، ارتفاع 70 سانتی‌متر و شیب صفر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی

در شکل 1، 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 (زیما و اکرم 2002).



شکل 1- نمای شماتیک تشکیل گرداب در یک سمت مانع استوانه‌ای (عزیزی و قمشی 1389).

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 (1973)، بلوین (1977) و زوکاسکاس و همکاران (1988) و ... صورت گرفته است که در تحقیقات آن‌ها انرژی صدایی با دامنه بالا در مجاری بسته تولید شده است.

در مقابل این موضوع، تحقیقاتی که به تشکیل گرداب و پدیده‌های مرتبط با آن در محیط آب پرداخته باشد بسیار کم است. کراس (1939) یافته‌های خود را در مورد امواج تولید شده در کانال‌های باز منتشر کرده است که احتمالاً اولین تحقیق در زمینه این موضوع هست. زیما و اکرم (2002) تحقیقاتی را در دبی ثابت و موانع با قطرهای مختلف در آب انجام داده‌اند و امواج نوع 1 و در برخی آزمایش‌ها امواج نوع 2 را مشاهده کرده‌اند، آن‌ها در نهایت رابطه‌ای برای شبیه‌سازی مقادیر بیشینه دامنه امواج عرضی به صورت بی بعد ارائه

است. برای انجام این تحقیق از فاصله 4 متری از انتهای فلوم، عرض فلوم توسط یک دیوار جداکننده به طول 4 متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر به دو قسمت مساوی تقسیم شده است.

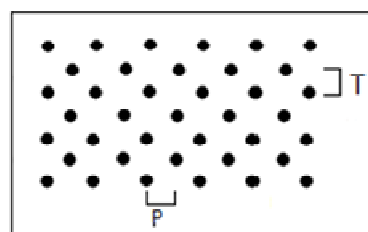
به‌منظور تثبیت موانع استوانه‌ای در مسیر جریان، از صفحات پلکسی گلاس به ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شده است که تمام سطح این صفحه‌ها با فواصل طولی و عرضی 30 میلی‌متر، شبکه‌بندی و سپس رزوه شده است تا بتوان موانع استوانه‌ای را روی آن‌ها پیچ نمود. سپس این صفحه‌ها در کف فلوم آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند و بر روی این صفحه‌ها، موانع با استفاده از پیچ‌هایی که در انتهای آن‌ها قرار دارند، در امتداد یک سمت دیوار جداکننده با فواصل طولی (P) و عرضی (T) متفاوت در آرایش زیگزاگی که بیشترین تأثیر را بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع داشته‌اند، پیچ شده‌اند (طاهریان و همکاران 1391). از جمله موارد و اهداف مهم در تحقیقات انجام شده پیرامون امواج عمود بر جریان، تشکیل این نوع امواج و وقوع پدیده تشدید هست. آرایش زیگزاگی موانع و فواصل طولی و عرضی آن‌ها در شکل 2 و نمونه‌ای از قرارگیری موانع در فلوم آزمایشگاهی در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3- نمونه‌ای از نحوه قرارگیری موانع در فلوم.

ثبت مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایطی که موج عرضی با بیشینه دامنه تشکیل می‌شود انجام شده است. در این شرایط دامنه امواج (به‌صورت بیشینه و کمینه عمق جریان روی دیواره فلوم) و عمق جریان توسط خطکش‌هایی که در 3 مقطع با فاصله‌های طولی 50،

علوم آب دانشگاه شهید چمران انجام شده است. موانع مورد استفاده در مسیر جریان استوانه‌های چوبی به قطر 12 و 25 میلی‌متر و ارتفاع 35 سانتی‌متر بوده است. بررسی‌ها نشان داده است که معلق شدن ذرات رسوبی و عدم حرکت ذرات به‌صورت بار شسته و هم‌چنین هم-پوشانی بهتر گرداب‌های تشکیل شده متناسب با عرض فلوم آزمایشگاهی را می‌توان از مزایای به کار بردن موانع مذکور در تحقیق انجام شده ذکر کرد (طاهریان و همکاران 1391). هم‌چنین آزمایش‌ها با دبی 25 لیتر بر ثانیه انجام شده است. جریان آب خروجی از فلوم پس از تخلیه در حوضچه کوچک موجود در پایین‌دست فلوم، به حوضچه بزرگ‌تری که در انتهای آن سرریز مثلثی 53 درجه جهت تنظیم دبی عبوری ساخته شده است، هدایت گردیده و با قرائت ارتفاع آب روی سرریز و با استفاده از رابطه دبی اشمل مربوط به سرریز مثلثی موجود، دبی موردنظر تنظیم شده است. به‌منظور استهلاك انرژی جریان ورودی، یک آرام‌کننده 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 بیشینه (متناسب با عمق جریانی که امواج عرضی شکل می‌گیرند) تا ارتفاع صفر با گام‌های 5 میلی‌متر تغییر کرده



شکل 2- آرایش زیگزاگی موانع.

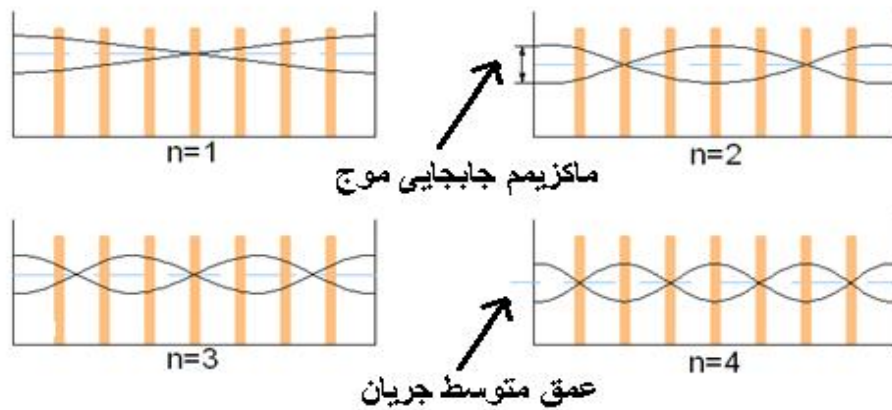
هر یک از آزمایش‌های این تحقیق در طی دو مرحله صورت گرفته است، در مرحله اول، آزمایش‌های هیدرولیکی پس از ایجاد آرایش موردنظر موانع و تنظیم دبی، با تغییر ارتفاع دریچه کشویی (گام 5 میلی‌متر در هر مرحله) و تغییر شرایط هیدرولیکی جریان، با هدف

موج با حرف n و شماره‌های 1 تا 4 نام‌گذاری می‌شوند. این امواج با بیشینه دامنه، زمانی شکل می‌گیرند که طول موج گردابه بر عرض مجرای حرکت آب تطبیق کند و تشدید صورت پذیرد. در این حالت تعداد صحیحی از گره‌ها در عرض فلوم جا می‌گیرند که تعداد آن‌ها، همان نوع موج هست. در شکل 4 این چهار نوع موج نشان داده شده‌اند.

به‌طور کلی در فلوم آزمایشگاهی در حالتی که موانع مستغرق هستند هیچ موجی تشکیل نمی‌شود و با کاهش تدریجی عمق جریان (با کاهش ارتفاع سرریز) موج نوع 1 با دامنه کم شروع به نوسان می‌کند، با کاهش بیشتر عمق جریان دامنه موج نوع 1 بیشتر می‌شود تا این‌که به یک مقدار بیشینه می‌رسد. با کاهش مجدد عمق، دامنه موج به تدریج کاهش می‌یابد، تا این‌که موج نوع 1 به‌طور کامل محو می‌شود. با کاهش بیشتر عمق به تدریج موج نوع 2 تشکیل می‌شود، این موج هم پس از رسیدن به یک دامنه نوسان بیشینه، در کاهش‌های بعدی عمق جریان از بین می‌رود. موج‌های نوع 3 و 4 نیز در صورت وجود با همین روند تشکیل می‌شوند. همان‌گونه که در جدول 1 مشاهده می‌شود در آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق حاضر، فقط دو نوع موج عمود بر جریان در فلوم آزمایشگاهی تشکیل شده است. لذا در این تحقیق، 4 آزمایش کلی که هر آزمایش نیز شامل 3 آزمایش در شرایط عدم حضور موج در فلوم، حضور موج نوع 1 و موج نوع 2 هست انجام گردیده است و در مجموع شامل 12 آزمایش هست.

155 و 260 سانتی‌متری از ابتدای بازه موانع (با فواصل یکسان) از یکدیگر در طول بازه مانع‌گذاری شده قرار داده شده‌اند، اندازه‌گیری شده است و متوسط دامنه‌ها و عمق‌های قرائت‌شده به‌عنوان دامنه هر موج تشکیل‌شده و متوسط عمق جریان ارائه شده است و نوع موج مشاهده شده نیز ثبت شده است. در جدول 1، مشخصات کلی آزمایش‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر و هم-چنین مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایط تشکیل موج عرضی با بیشینه دامنه ارائه شده است. در ستون 1 از جدول 1، شماره آزمایش‌ها مشخص شده است. در ستون 2، قطر موانع، در ستون 3، فاصله بین استوانه‌های متوالی در هر ردیف، در ستون 4، فاصله بین ردیف‌های موانع، در ستون 5، دبی جریان، در ستون 6، تراکم موانع (میانگین مجموع موانع در دو ردیف متوالی)، در ستون 7، نوع موج، در ستون 8، عمق جریان بالادست فلوم، در ستون 9، متوسط دامنه موج در بازه مانع‌گذاری (از میانگین دامنه‌های قرائت‌شده در 3 مقطع بازه مانع‌گذاری شده مشخص شده است) نشان داده شده است. در ستون 10، دامنه بی‌بعد امواج نسبت به عمق جریان ارائه شده است و در ستون‌های 11 و 12 به ترتیب متوسط عمق جریان در بازه موانع (از میانگین عمق‌های قرائت‌شده در 3 مقطع بازه مانع‌گذاری شده مشخص شده است) و متوسط عمق جریان در بازه بدون مانع نشان داده شده است.

در جریان مجاری روباز، معمولاً چهار نوع موج عمود بر جریان تشخیص داده می‌شود. این چهار نوع



شکل 4- انواع امواج عمود بر جریان (عزیزی و قمشی 1389).

استفاده شده است که در ادامه تحقیق از آن‌ها تحت عنوان ذرات با دانه‌بندی ریزتر و درشت‌تر یاد خواهد شد. مشخصات رسوبات مذکور در جدول 2 ارائه شده است که d_{10} ، d_{60} ، d_{84} بر حسب میکرومتر به ترتیب قطر مربوط به ذراتی است که 84 درصد، 60 درصد، ... و 10 درصد وزنی ذرات کوچک‌تر از آن می‌باشند. C_u ضریب یکنواختی و S_g انحراف معیار هندسی ذرات می‌باشند.

پس از ثبت مشخصات هیدرولیکی جریان در شرایطی که موج عمود بر جریان با بیشینه دامنه تشکیل می‌شود، سپس از ابتدای فلوم تا فاصله یک متری از ابتدای دیوار جداکننده، کف فلوم توسط ذرات رسوب به ضخامت 30 میلی‌متر پوشانده شده است. به‌طورکلی در تحقیق حاضر، از دو نمونه رسوب غیرچسبیده با دانه‌بندی ریزودرشت‌تر مانند پودر سنگ فیلتر تصفیه‌خانه‌ها با قطر متوسط 0/12 میلی‌متر و ماسه‌بادی با قطر متوسط 0/35 میلی‌متر که در آزمایشگاه موجود نیز بودند

جدول 1- مشخصات کلی آزمایش‌های هیدرولیکی جریان در شرایط تشکیل موج عمود بر جریان با بیشینه دامنه.

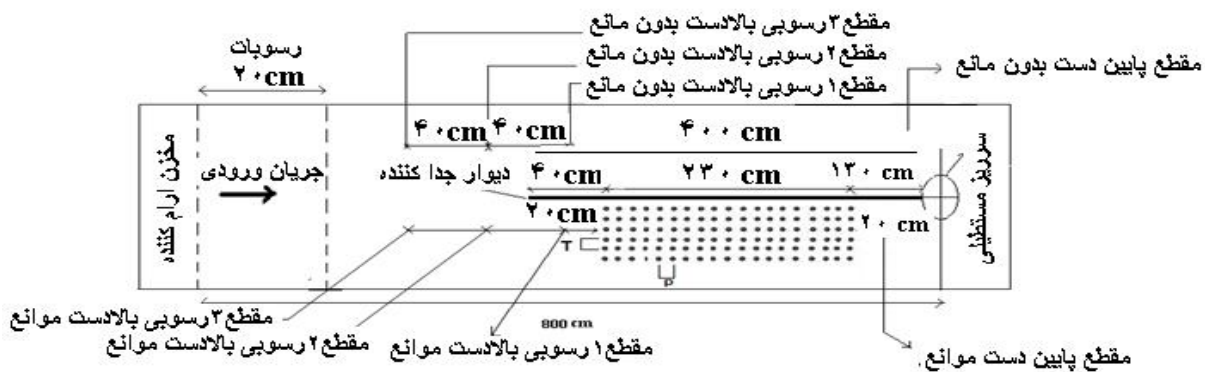
شماره آزمایش	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	D (mm)	T (mm)	P (mm)	Q (L S ⁻¹)	N	n	h_u (cm)	$A_{average}$ (mm)	A/h	h_{avl} (cm)	h_{av2} (cm)	
							...	29/3	...	...	28/2	28/8
1	12	60	120	25	6/5	1	27/3	15/5	0/06	25/8	26/7	
						2	17/9	16/5	0/10	16/5	17/4	
						...	26/3	...	...	25/1	24/9	
2	12	120	120	25	3/5	1	24/7	11/5	0/05	23	24/4	
						2	19/6	14/5	0/08	18/1	19	
						...	17/9	...	...	16/2	17/1	
3	25	120	120	25	3/5	1	15	23/5	0/18	13	14/5	
						2	10/1	26/5	0/3	8/8	9/6	
						...	12/8	...	...	11/1	12/3	
4	25	120	180	25	2/5	1	15/8	26	0/18	14/4	15/2	
						2	10/9	22/5	0/25	9	10/1	

جدول 2- مشخصات مصالح رسوبی مورد استفاده.

پارامتر	d_{84} (mm)	d_{60} (mm)	d_{50} (mm)	d_{30} (mm)	d_{16} (mm)	d_{10} (mm)	C_u	S_g
دانه بندی ریزتر	144/09	139/60	127/62	104/48	93/92	83/88	1/66	1/24
دانه بندی درشت تر	467	382/50	349/52	286/29	264/62	205/17	1/86	1/30

در مرحله دوم، آزمایش‌های رسوبی با هدف اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق در 3 مقطع (1، 2 و 3 رسوبی) در بالادست بازه موانع و به‌طور متقابل در بالادست بازه بدون مانع و همچنین در 1 مقطع در پایین‌دست بازه موانع و به‌طور متقابل در بازه بدون مانع و در هر مقطع در سه عمق 0/2h، 0/6h و 0/8h توسط دستگاه کدورت‌سنج قابل‌حمل مدل 160 ANALITE محصول شرکت Mc Van در شرایط حضور و عدم حضور موج در بازه موانع (با حضور موانع در این بازه) انجام شده است و متوسط غلظت در هر مقطع

محاسبه شده است. این دستگاه با Probe 90 درجه مقادیر کدورت جریان را بر حسب واحد NTU و بیشینه تا 2000 NTU را اندازه‌گیری می‌کند و بر اساس منحنی واسنجی دستگاه می‌توان مقادیر کدورت جریان را به غلظت بر حسب واحد گرم بر لیتر تبدیل کرد. در شکل 5 مقاطع مورد استفاده در فلوم آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق در تمامی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نشان داده شده است. شکل 6 دستگاه کدورت‌سنج مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل 5- نمایی شماتیک از محل قرارگیری دیوار جداکننده و مقاطع اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق در فلوم.



شکل 6- دستگاه کدورت‌سنج.

وجود آمده و موج با بیشینه دامنه شکل می‌گیرد. حال با توجه به آن‌که تمامی آزمایش‌های تحقیق حاضر در شرایط حضور موج با بیشینه دامنه انجام شده است، در نتیجه در این حالت، $\frac{f_s}{f} = 1$ و از رابطه فوق حذف می‌شود. همچنین بر اساس رابطه بین نوع موج (n) با طول موج و عرض فلوم که در رابطه 3 ارائه شده است، لذا تأثیر پارامتر بدون بعد $\frac{b}{l}$ در پارامتر نوع موج (n) وجود داشته و این پارامتر نیز از رابطه فوق خارج می‌گردد.

$$n = \frac{2b}{l} \quad [3]$$

با توجه به این‌که سرعت سقوط ذرات تابعی از متوسط قطر ذره هست و میزان آن برای هر دانه‌بندی ثابت است لذا عدد رینولدز سقوط ذره $(\frac{wd_s r}{m})$ برای هر دانه‌بندی ثابت خواهد بود و از رابطه 2 حذف می‌شود. از طرفی از حاصل ضرب این پارامتر و پارامتر بدون بعد $(\frac{U_*}{w})$ ، عدد رینولدز ذره $(\frac{U_* d_s r}{m})$ حاصل می‌گردد بنابراین تأثیر این پارامتر در سرعت برشی و اندازه ذره وجود دارد و در نتیجه با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد $(\frac{U_*}{w})$ و $(\frac{d_s}{h})$ در رابطه 2، عدد رینولدز ذره نیز از رابطه مذکور حذف خواهد شد. لذا رابطه 2 که شامل 17 پارامتر بدون بعد هست، به رابطه 4 که شامل 13 پارامتر بدون بعد است، تبدیل می‌شود.

$$C = F\left(\frac{A}{h}, \frac{f_s D}{U}, \frac{U}{\sqrt{gh}}, n, \frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N, \frac{d_s}{h}, \frac{r_s}{r}, \frac{U_*}{w}, \frac{D}{b}, \frac{U r}{m}\right) = 0 \quad [4]$$

نتایج و بحث

نتایج نشان می‌دهند که در آزمایش‌های مرحله اول یعنی در حالتی که موج عرضی با بیشینه دامنه در

در مرحله دوم هر یک از آزمایش‌ها، ارتفاع دریچه کشویی تا جایی بالا آورده شده است که موج عمود بر جریان موجود کاملاً حذف شود و مانند مرحله اول، غلظت رسوبات معلق در مقاطع ذکر شده در شرایطی که موج در فلوم وجود ندارد نیز اندازه‌گیری شده است. به‌منظور بررسی تأثیر موج عرضی بر غلظت رسوبات معلق، از روش تحلیل ابعادی استفاده گردیده و متغیرهای موجود در این تحقیق در رابطه زیر در نظر گرفته شده است.

$$f(A, h, Q, N, n, f_s, f, b, l, m, r, g, U, T, P, D, P_a, [U_*, w, C, r_s, d_s]) = 0 \quad [1]$$

در رابطه فوق، P_a آرایش قرارگیری موانع استوانه‌ای، l طول موج، f_s فرکانس نیروی تناوبی ناشی از گرداب موانع، f فرکانس موج عرضی، U_* سرعت برشی جریان، U سرعت متوسط جریان، w سرعت سقوط ذرات، C میزان درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع تحت اثر امواج عمود بر جریان، d_s قطر متوسط ذرات رسوب و r_s جرم واحد حجم رسوب می‌باشند. در آزمایش‌های تحقیق حاضر به دلیل ثابت بودن دبی جریان و آرایش موانع از این دو پارامتر صرف‌نظر شده است و سپس با استفاده از روش باکینگهام و با در نظر گرفتن متغیرهای U ، h و r به عنوان متغیرهای تکراری رابطه‌ی فوق که شامل 22 متغیر است به رابطه زیر که شامل 17 پارامتر بدون بعد هست، تبدیل شده است.

$$f\left(\frac{A}{h}, \frac{f_s D}{U}, \frac{U}{\sqrt{gh}}, \frac{f_s}{f}, \frac{b}{l}, n, \frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N, \frac{d_s}{h}, \frac{U_*}{w}, \frac{r_s}{r}, \frac{wd_s r}{m}, C, \frac{D}{b}, \frac{U_* d_s r}{m}\right) = 0 \quad [2]$$

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، هنگامی که طول موج گردابه بر عرض مجرای حرکت آب تطبیق کند حالت تشدید به

وابستگی بین آن‌ها و عدم تأثیرپذیری از یکدیگر هست. از طرفی در آزمایش‌های انجام شده کمینه و بیشینه میزان عدد رینولدز به ترتیب 9680 و 16720 بوده است که بیشتر از 2000 و بنابراین حاکی از جریان متلاطم بوده و در نتیجه نقش عدد رینولدز بر جریان قابل اغماض هست. سپس در ادامه برای بخش اول و دوم آزمایش‌ها و برای هر دانه‌بندی به‌طور جداگانه، ارتباط بین هر یک از گروه‌های بدون بعد مستقل مؤثر (دامنه نسبی موج و نوع موج) و گروه بدون بعد وابسته (درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع) در قالب دو دسته مختلف نسبت قطر موانع به عرض فلوم (0/024 و 0/05) ترسیم و بررسی شده است. بدین صورت مشخص شده است که کدام یک از گروه‌های بدون بعد انتخابی از ارجحیت بیشتری نسبت به سایر گروه‌ها برخوردار هستند. علت ترسیم نتایج در اشکال جداگانه بر حسب متغیرهای اصلی مانند قطر موانع و قطر ذرات از آن جهت است که تأثیر این عوامل بر غلظت رسوبات معلق چنان بوده است که علی‌رغم این‌که روند ارتباط بین گروه متغیر وابسته و هر یک از گروه‌های متغیر مستقل برای اغلب حالات مشابه است لیکن ترکیب کل داده‌های آزمایشی به دست آمده از آزمایش‌ها شرایطی را ایجاد می‌نمایند که با مشاهده روند تغییرات کلی نتایج با یکدیگر انتظار لازم از یک همبستگی مناسب را فراهم نخواهند کرد. در نهایت گروه‌های بدون بعد مستقل مناسب به صورت حاصل-ضربی و با نماهای متفاوت در نظر گرفته شده است تا به کمک نرم‌افزار SPSS سعی در تعیین رابطه‌ای بین آن‌ها به‌ازاء بیشترین ضریب R^2 گردد. لذا رابطه کلی درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع تحت اثر موج نوع 1 و موج نوع 2 نسبت به شرایطی که موج در فلوم وجود ندارد به ترتیب به صورت رابطه 5 و 6 حاصل شده است.

فلوم آزمایشگاهی تشکیل شده است، غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع کمتر از بازه بدون مانع شده است. به گونه‌ای که برای ذرات با دانه‌بندی ریزتر در شرایط وجود موج نوع 1 و 2 بیشینه درصد کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع به ترتیب حدود 12/5 و 8/3 درصد و برای ذرات با دانه‌بندی درشت‌تر حدود 8/6 و 3/7 مشاهده شده است که این تغییرات در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. در آزمایش‌های 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 برابر یا بیشتر از انتهای بازه بدون مانع هست. علت این امر این است که چون چگالی آب از چگالی ذرات رسوب معلق کمتر هست، خطوط جریان بیشتر از رسوبات به بازه بدون مانع که سرعت جریان بیشتر از بازه موانع هست منحرف می‌شوند. بنابراین غلظت رسوبات معلق در بازه موانع بیشتر از بازه بدون مانع در شرایطی که در فلوم موج عرضی وجود نداشته باشد، خواهد بود. با تشکیل امواج عرضی در فلوم رسوبات موجود در بازه موانع به پایین دست منتقل نشده و در اثر موج، رسوبات به بالادست این بازه انتقال داده می‌شوند و در آنجا ته‌نشین شده و یا به بازه بدون مانع منتقل خواهند شد.

بر اساس رابطه 4 برای بررسی اثر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته (C) و تعیین ارجحیت هر یک از آن‌ها نسبت به سایر گروه‌های بی‌بعد و نیز ایجاد رابطه رگرسیونی بین آن‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است و به کمک این نرم‌افزار رابطه همبستگی بین کلیه گروه‌های بی‌بعد به صورت دوه‌دو مورد جستجو قرار گرفت که بر اساس نتایج، همبستگی‌های به دست آمده بین متغیرهای $\frac{A}{h}$ ، Re ، Fr ، $\frac{r_s}{r}$ ، $\frac{d_s}{h}$ و $\frac{D}{b}$ در سطح 1 درصد معنی‌دار بوده است که نشان‌دهنده عدم

برای دانه‌بندی ریزتر 0/0004 تا 0/0012 و برای دانه-بندی درشت‌تر 0/0012 تا 0/0035 و نسبت قطر موانع به عرض فلوم ($\frac{D}{b}$) برابر با 0/024 و 0/05 هست. به منظور مقایسه و تجزیه و تحلیل درصد کاهش غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و برآورد شده توسط روابط پیشنهادی، از شاخص‌های آماری شامل مجذور ضریب همبستگی (R^2)، شیب‌خط رگرسیون (a)، درصد خطا ($\%E$) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید و خلاصه نتایج در جدول 3 ارائه شده است.

$$C = \frac{0.19}{\sqrt{\frac{AaD^{0.4}}{C} + \frac{ad_{50}^{0.2}}{C}}} \quad [5] \text{ برای موج نوع 1}$$

$$C = \frac{0.11}{\sqrt{\frac{AaD^{0.4}}{C} + \frac{ad_{50}^{0.4}}{C} + \frac{ad_{50}^{0.3}}{C}}} \quad [6] \text{ برای موج نوع 2}$$

در روابط ارائه شده در تحقیق حاضر، محدوده تغییرات دامنه نسبی موج ($\frac{A}{h}$)، 0/05 تا 0/30، نسبت قطر متوسط ذرات رسوب به عمق متوسط جریان ($\frac{d_{50}}{h}$)

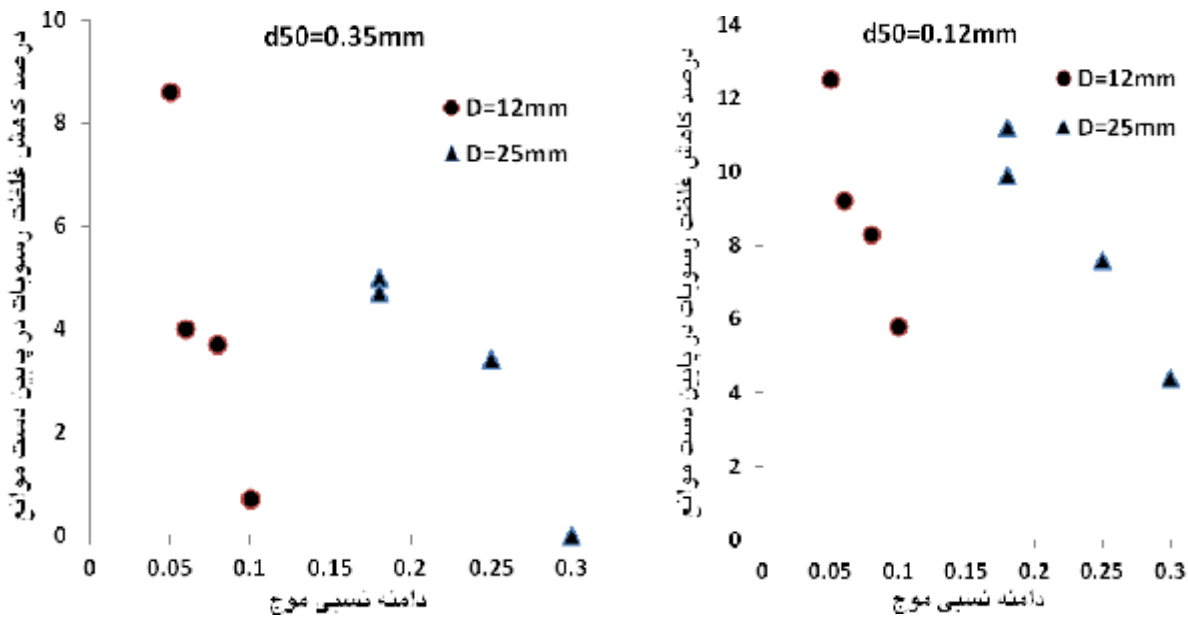
جدول 3- نتایج حاصل از تحلیل آماری روابط در پیش‌بینی درصد کاهش غلظت ذرات معلق.

روابط	R^2	a	$\%E$	RMSE
(4)	0/89	0/85	20/8	2/1
(5)	0/81	0/90	24/2	3/1

درصد کاهش غلظت رسوبات معلق انتهای دو سمت دیوار جداکننده (پایین دست بازه موانع نسبت به پایین دست بازه بدون مانع) در شرایط وجود موج عرضی در مقابل تغییرات دامنه نسبی موج برای ذرات با دانه-بندی ریزتر در شکل 7 (الف) و برای ذرات با دانه‌بندی درشت‌تر در شکل 7 (ب) نشان داده شده است.

بنابراین بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول 3، روابط مذکور در محاسبات غلظت رسوبات معلق از مقبولیت و دقت کافی برخوردارند.

به منظور بررسی تأثیر قطر موانع و دامنه امواج بر کاهش غلظت رسوبات معلق پایین دست موانع، نتایج حاصل از آزمایش‌ها در دو دسته متفاوت قطر موانع 12 و 25 میلی‌متر تفکیک و نمودار تغییرات



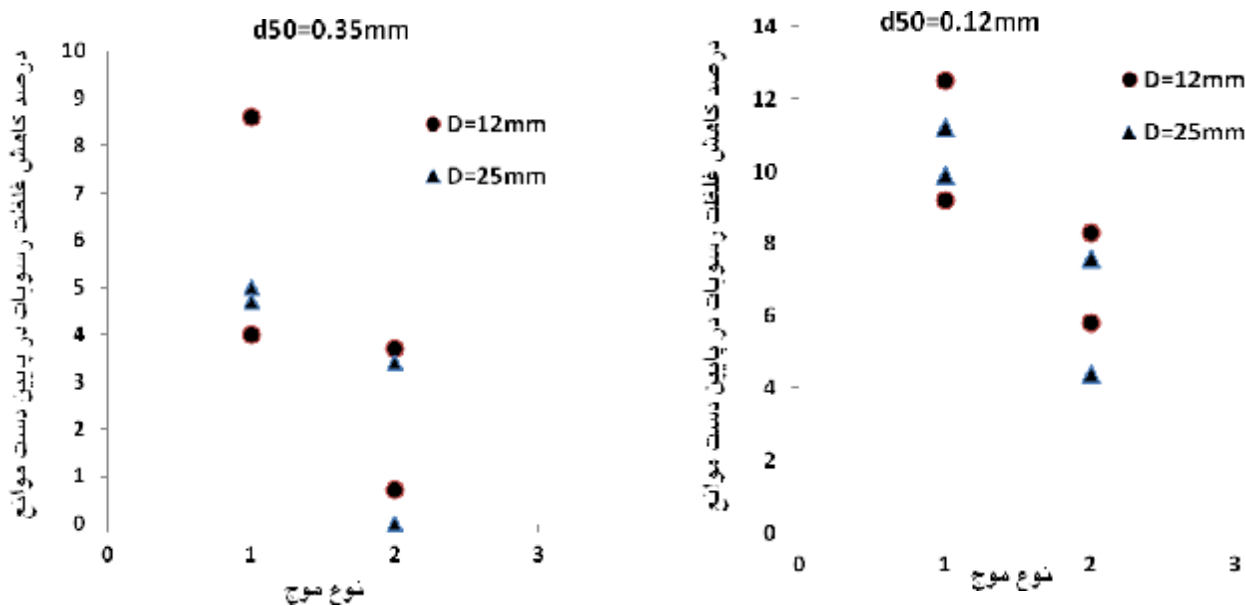
ب) ذرات با دانه بندی درشت تر

الف) ذرات با دانه بندی ریزتر

شکل 7- تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق پایین دست بازه موانع نسبت به پایین دست بازه بدون موانع در مقابل تغییرات دامنه نسبی موج.

ترتیب حدود $12/5$ و $8/6$ درصد و برای موانع با قطر 25 میلی متر حدود $11/2$ و 5 مشاهده شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر نوع موج عرضی بر کاهش غلظت رسوبات معلق پایین دست موانع، نتایج حاصل از آزمایشها در دو دسته متفاوت قطر موانع 12 و 25 میلی متر تفکیک و نمودار تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق انتهای دو سمت دیوار جداکننده در شرایط وجود موج عرضی در مقابل تغییرات نوع موج عرضی برای ذرات با دانه بندی ریزتر در شکل 8 (الف) و برای ذرات با دانه بندی درشت تر در شکل 8 (ب) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 8 (الف و ب) مشاهده می شود، برای هر دو نوع دانه بندی، موج نوع 1 در مقایسه با موج نوع 2 تأثیر بیشتری بر کاهش غلظت ذرات معلق در پایین دست بازه موانع با قطر 12 و 25 میلی متر دارد.

همان گونه که در شکل 7 (الف و ب) مشاهده می شود، برای هر دو نوع دانه بندی، افزایش دامنه نسبی موج باعث کاهش اختلاف غلظت ذرات معلق در پایین دست بازه موانع نسبت به بدون مانع در شرایط وجود موج عرضی می شود. به طوری که میزان کاهش غلظت رسوبات معلق با دانه بندی ریزتر در پایین دست موانع با قطر 12 و 25 میلی متر حدود 7 درصد و برای رسوبات معلق با دانه بندی درشت تر در پایین دست موانع با قطر 12 و 25 میلی متر به ترتیب حدود 8 و 5 درصد کاهش یافته است. همچنین افزایش قطر موانع باعث کاهش میزان عملکرد موانع بر کاهش غلظت ذرات معلق در پایین دست بازه موانع در شرایط وجود موج عرضی می شود. به گونه ای که در تمامی آزمایشها بیشینه درصد کاهش غلظت رسوبات معلق با دانه بندی ریزتر و درشت تر در پایین دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع برای موانع با قطر 12 میلی متر به-



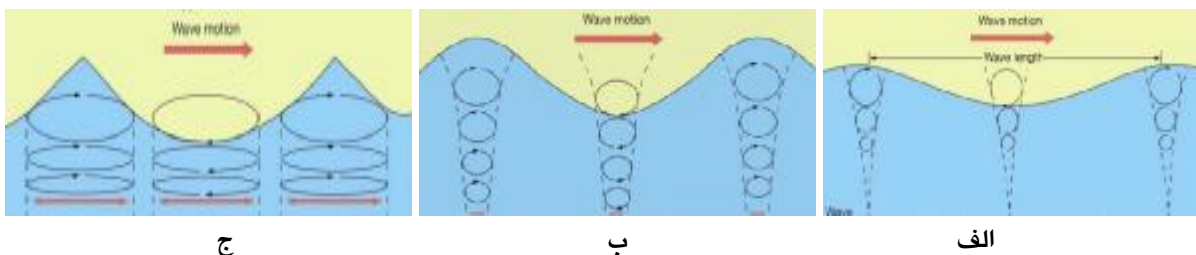
(ب) ذرات با دانه بندی درشت تر

(الف) ذرات با دانه بندی ریزتر

شکل 8- تغییرات درصد کاهش غلظت رسوبات معلق پایین دست بازه موانع در مقابل تغییرات نوع موج.

علت این که موج نوع 1 در مقایسه با موج دو تأثیر بیشتری بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین دست موانع دارد را می توان این گونه بیان کرد که به طور کلی امواج بر اساس نسبت عمق جریان به طول موج (در این تحقیق طول موج نوع 1، برابر با عرض بازه موانع یعنی 50 سانتی متر و طول موج نوع 2 نصف طول موج نوع 1 یعنی 25 سانتی متر هست) به 3 دسته امواج آب عمیق ($h/\lambda > 0/5$)، کم عمق ($h/\lambda < 0/05$) و بینابین ($0/05 \leq h/\lambda < 0/5$) طبقه بندی می شوند. در امواج آب عمیق فقط لایه سطحی جریان آب بر اثر حرکت موج متأثر می گردد، در صورتی که در امواج آب کم عمق، همه عمق جریان آب با حرکت موج تحت تأثیر قرار می گیرد (شکل 9).

شکل 9- الف: امواج عمیق، ب: امواج بینابین، ج: امواج کم عمق (عطایی آشتیانی و بهشتی 1386).



شکل 9- الف: امواج عمیق، ب: امواج بینابین، ج: امواج کم عمق (عطایی آشتیانی و بهشتی 1386).

از آنجاکه در تحقیق حاضر، در تمامی آزمایش ها بر اساس محاسبات انجام شده، محدوده تغییرات نسبت عمق جریان به طول موج برای موج نوع 1، 0/26 تا 0/46 و برای موج نوع 2، 0/54 تا 0/68 هست لذا موج نوع 1 در دسته امواج کم عمق و موج نوع 2 در دسته امواج عمیق قرار گرفته است و اثرگذاری موج نوع 1 که در دسته امواج کم عمق قرار دارد بر لایه های زیرین جریان و پس زدن آن ها به بالادست افزون است. لذا غلظت رسوبات معلق منتقل شده به پایین دست بازه موانع کاهش یافته است.

موانع کاهش یافته است.

بررسی پارامترهای بدون بعد که دارای تأثیر معنی‌دار بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع در شرایط حضور امواج عرضی در فلوم هستند، پرداخته شده است و در نهایت روابط جدیدی جهت تعیین میزان کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع تحت اثر امواج عرضی ارائه شده است که تمامی موارد ذکر شده، در هیچ تحقیق دیگری تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

نتیجه‌گیری کلی

در آزمایش‌های رسوبی انجام گرفته مشاهده گردید در حالت وجود موج عرضی ناشی از موانع، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع کمتر از انتهای بدون مانع 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 جداکننده برای آزمایش‌های مرحله اول و دوم می‌توان نتیجه گرفت که امواج عمود بر جریان بر انتقال رسوبات معلق به سمت پایین‌دست موانع تأثیر دارد و کاهش انتقال رسوبات معلق در بازه موانع، باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع می‌گردد و موج نوع 1 بیشترین تأثیر را بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع داشته است.

همان‌گونه که نتایج این تحقیق در آزمایش‌ها انجام گرفته نشان داد، نوع دانه‌بندی و قطر موانع به‌عنوان پارامترهای تعیین‌کننده اثر بسیار زیادی بر نتایج داشته‌اند و امکان جداسازی نتایج را برحسب دانه‌بندی و قطر موانع فراهم نمودند. لذا پس از انجام تحلیل ابعادی و بر اساس نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS دامنه نسبی امواج، نسبت قطر موانع به عرض فلوم، نوع موج عرضی و نسبت قطر متوسط ذرات به عمق متوسط جریان به‌عنوان پارامترهای مهم در برآورد میزان کاهش غلظت ذرات معلق در پایین‌دست موانع در شرایط وجود

همچنین مقایسه شکل 8 (الف و ب) که تفاوت شرایط آزمایشی آن‌ها فقط مربوط به قطر ذرات هست، نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات عملکرد موانع و موج عرضی بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع با آرایش زیگزاگی کاهش یافته و محدوده تغییرات پارامتر بدون بعد وابسته از مقادیر کمتری برخوردار بوده و میزان کاهش غلظت رسوبات معلق با دانه‌بندی درشت‌تر در پایین‌دست موانع کمتر شده است. به‌عنوان نمونه، برای ذرات با دانه‌بندی ریزتر در شرایط وجود موج نوع 1، محدوده تغییرات پارامتر بدون بعد وابسته از 9/2 تا 12/5 درصد یعنی به‌طور متوسط حدود 11 درصد و برای ذرات با دانه‌بندی درشت‌تر 4 تا 8/6 درصد یعنی به‌طور متوسط حدود 6 درصد هست.

از جمله تحقیقاتی که تاکنون پیرامون غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع انجام شده است، می‌توان به تحقیقات طاهریان و همکاران (1391) اشاره نمود. آن‌ها به بررسی تأثیر قطر موانع در شرایط وجود موج عرضی ناشی از گرداب موانع بر غلظت رسوبات معلق با دانه‌بندی ریزتر 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 مانع است. اما تحت اثر تشکیل این امواج عکس این وضعیت اتفاق می‌افتد و غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع در شرایط وجود موج نوع 1 و 2 به ترتیب حدود 10 و 7 درصد کاهش یافته است. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج این محققین نیز این حقیقت را نشان داده است و غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بازه بدون موانع در شرایط وجود موج نوع 1 و 2 به ترتیب حدود 12/5 و 8/3 درصد کاهش یافته است. علاوه بر آن در تحقیق حاضر تأثیر امواج عرضی بر غلظت رسوبات معلق با دانه‌بندی درشت‌تر در پایین‌دست بازه موانع نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است، همچنین به

دانه‌بندی معین با افزایش قطر موانع میزان کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع کاهش یافته است. از طرفی تأثیر امواج عرضی بر کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست بازه موانع با افزایش اندازه متوسط ذرات کاهش یافته است. در حقیقت میزان کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع تحت اثر امواج عرضی برای ذرات با دانه‌بندی ریزتر بیشتر از درشت‌تر بوده است.

امواج عرضی تأثیر داشته و امکان به‌دست آوردن رابطه کلی را فراهم نمودند. همچنین نتایج به‌دست آمده در مورد میزان کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع در شرایطی با دانه‌بندی و قطر موانع یکسان اما با دامنه نسبی متفاوت امواج نشان داد افزایش دامنه نسبی موج باعث کاهش اختلاف غلظت ذرات معلق در پایین‌دست بازه موانع نسبت به بدون موانع در شرایط وجود موج عرضی شده است. در یک

منابع مورد استفاده

- انتظاری ع، 1381. مکانیک سیالات. انتشارات نوپردازان.
- طاهریان ف، قمشی م و پوستی زاده ن، 1391. بررسی تأثیر قطر موانع در شرایط وجود موج عمود بر جریان ناشی از گرداب موانع بر غلظت رسوبات معلق. صفحه‌های 45 تا 56، نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بیست و سوم و بیست و چهارم بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- عزیزی ر و قمشی م، 1389. رابطه فرکانس امواج عمود بر جریان در مجاری روباز با مشخصات جریان و موانع. مجله تحقیقات منابع آب ایران، جلد 2، شماره 6، صفحه‌های 57 تا 65.
- عطایی آشتیانی ب و بهشتی ع، 1386. مکانیک امواج آب (ترجمه). جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- قمشی ع، 1388. امواج عمود بر جریان ناشی از گرداب موانع در مجاری روباز و تأثیر آن بر شکل بستر. صفحه‌های 21 تا 32، مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بیست و سوم و 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. Van Nostrand Reinhold, New York.

Fitz-hugh JS, 1973. Flow induced vibration in heat exchangers. Pp. 1-17. proc. UKAEA/NPL International Symposium on Vibration Problems in Industry, Keswick, England.

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. Pp. 68-78. IAHR-APD Congress, 21-24 February, the School of Engineering, the University of Auckland, New Zealand.

Naudascher E and Rockwell D, 1979. Practical experiences with flow-induced vibration. Pp. 151-164. Symposium Karlsruhe, 3-6 September, University of Karlsruhe, Germany.

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.