

بررسی مشاهدات آزمایشگاهی تأثیر مانع مثلثی شکل در کف مخزن بر ساختار جریان گل آلود

ماندانا ناجی ابهری^{1*}، مرضیه ایرانشاهی²، مسعود قدسیان³، بهار فیروزآبادی⁴

1- استادیار، مؤسسه آموزش عالی اسرار، مشهد

2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* mandana.naji@gmail.com

چکیده - با توجه به رسوبگذاری جریان‌های گل آلود در مخازن سدها، شناخت هیدرودینامیک این جریان‌ها می‌تواند نقش بسزایی در شناخت پدیده‌های حاکم داشته باشد. استفاده از موانع نفوذناپذیر بر سر راه این جریان‌ها یک راهکار مؤثر در افزایش عمر مفید سدها خواهد بود. در این تحقیق تأثیر حضور مانع نفوذناپذیر مثلثی بر مکانیزم حرکت جریان‌های گل آلود، بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. سرعت بدنه جریان گل آلود در عمق، با استفاده از سرعت‌سنج صوتی اندازه‌گیری شده و پروفیل‌های غلظت جریان از روش ABS و بر اساس داده‌های پراکنش محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که وجود مانع سبب کاهش سرعت پیشروی پیشانی جریان گل-آلود در طول کانال، بطور میانگین تا 35 درصد می‌شود. امواج شکل گرفته در بالادست مانع از نوع A می‌باشد. شکل‌گیری پرش هیدرولیکی بعد از مانع سبب شده است که رژیم جریان ضمن عبور از مانع از حالت فوق‌بحرانی به حالت زیربحرانی تغییر یابد. وجود مانع سبب شکل‌گیری و تغییر در پروفیل‌های سرعت در بالادست مانع می‌شود. به علت وجود مانع یک حوضچه ته‌نشینی رسوب در بالادست مانع شکل گرفته که محل مناسبی برای ته‌نشینی و بدام انداختن رسوبات می‌باشد. راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در پایین‌دست مانع نسبت به مقادیر مشابه در حالت بدون مانع بطور میانگین تا 33 درصد افزایش یافته است.

کلید واژگان: مانع، مخزن، جریان گل آلود، پروفیل‌های سرعت، پروفیل‌های غلظت، عدد فرود چگالی محلی.

1- مقدمه

سدها، بررسی و مطالعه اینگونه جریان‌ها بسیار حائز اهمیت است (Middleton, 1970). مکانیزم حرکت جریان‌های چگال به علت وجود پدیده درون‌آمیختگی در سطح مشترک دو سیال نسبت به جریان در کانال‌های آزاد پیچیده‌تر بوده که نیازمند مطالعات بیشتری می‌باشد. با قرار گرفتن یک مانع بر سر راه جریان چگال بر پیچیدگی‌های حرکت این جریان افزوده شده و مکانیزم‌های ناشناخته افزایش می‌یابد. بنابراین به‌منظور درک بهتر برخورد جریان‌های چگال با مانع تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه

حرکت القا شده¹ ثقلی¹ یک سیال، در زیر سیال دیگر که در نتیجه اختلاف چگالی بین دو سیال ایجاد می‌شود جریان ثقلی یا جریان چگال² نامیده می‌شود (Simpson, 1997). این اختلاف چگالی می‌تواند بر اثر اختلاف دما، ذرات معلق و مواد شیمیایی باشد. به علت تأثیر جریان‌های چگال در پدیده‌های اقیانوسی، جوی و همچنین رسوبگذاری مخازن

1. Gravity-induced movement

2. Density currents

سیال و 4) ریزش امواج⁴ (Cebeza et al., 2009). آندرد و ماک حرکت رو به بالای جریان‌های گل‌آلود هنگام برخورد به موانع را بررسی کردند. نتایج حاصل از آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی آنها نشان داد که مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر حرکت جریان‌های گل‌آلود هنگام برخورد با موانع ضخامت جریان نزدیک‌شونده است (Underwood and Muck, 1990). الکساندر و موریس ته‌نشینی جریان‌های گل‌آلود در مجاورت موانع را، بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که نزدیک مانع موج‌های ایستاده‌ای⁵ شکل می‌گیرد که ضخامت و سرعت جریان اطراف مانع را تغییر می‌دهد و سبب ته نشین سریع و موضعی رسوبات و در نتیجه تغییرات ناگهانی ضخامت رسوب در سرتاسر کف مخزن می‌شود (Alexander and Morris, 1994). برزیک و وودز تأثیر توپوگرافی بستر، بر چگونگی ته‌نشینی جریان‌های غلیظ را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها دریافتند تا زمانی که جریان بلوکه نشده و یا بستر شامل تنگ‌شدگی، برآمدگی و یا بازشدگی ناگهانی نباشد، شکل ته‌نشینی به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند و هیچ عدم پیوستگی در ضخامت رسوبات ته‌نشین شده مشاهده نمی‌گردد (Bursik and Woods, 2000).

نتایج آزمایشگاهی اهی و اشالیس نشان داد که موانع نفوذ-ناپذیر با یک ارتفاع قابل قبول، یک راه مناسب برای بلوکه کردن جریان‌های غلیظ است. اگر ارتفاع مانع حداقل دو برابر ارتفاع جریان گل‌آلود نزدیک شونده باشد، وجود مانع تأثیر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. رسوب ته نشین شده در پایین دست مانع نفوذناپذیر در مقایسه با جریان گل‌آلود که بلوکه نشده است 6-8 برابر کاهش پیدا می‌کند (Ohey and Schleiss, 2007). سیمپسون و رتمن امواج شکل‌گرفته هنگام برخورد جریان‌های چگال با مانع را بر اساس نسبت ارتفاع موج برگشتی (d_h) به ارتفاع جریان نزدیک شونده (d)، به سه نوع متفاوت تقسیم‌بندی کردند. بر اساس تقسیم‌بندی آنها چنانچه $\frac{d_h}{d} > 3$ باشد موج برگشتی نوع C خواهد بود. موج نوع C قویترین موج شکل‌گرفته در تقسیم‌بندی Rottman and Simpson (1989) می‌باشد. در

انجام شده است. ویلکینسون و وود (1971) در جریان‌های چگال دولایه‌ای، ناحیه‌ای با تغییرات سریع را بررسی کردند. این ناحیه با تغییرات سریع در جریان‌های چگال دولایه‌ای مشابه پرش هیدرولیکی در کانال‌های باز می‌باشد و پرش چگال¹ نامیده می‌شود، زیرا این پدیده همراه با تغییر چگالی جریان می‌باشد. نتایج آنها نشان داد که برای یک پرش چگال با شرایط معلوم در بالادست ممکن است محدوده‌ای از حالات مختلف در پایین‌دست وجود داشته باشد، به‌گونه‌ای که دو مقدار متفاوت عدد فرود پایین‌دست می‌تواند معادله حرکت را ارضا کند. اما مشاهدات نشان می‌دهد که شرایط جریان تنها در عدد فرود بزرگتر پایدار است (Wilkinson and Wood, 1971).

چن و رتمن موج‌های ثقلی ایجاد شده در نتیجه عبور جریان لایه‌بندی شده پایدار از روی مانع را با استفاده از یک مدل عددی دو بعدی مطالعه کردند. یافته‌های آنها نشان داد که عدد فرود مهمترین پارامتر در تعیین رفتار جریان‌های برشی آزاد² است (Chen and Rottman, 1994). لین‌سرف و همکاران تأثیر موانع بر حرکت جریان‌های ثقلی را بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که جریان چگال پس از برخورد به مانع به چندین ناحیه تقسیم می‌شود: 1) جریان ورودی، 2) پرش هیدرولیکی، 3) جریان بر روی مانع و 4) جریان در پایین‌دست مانع (Lane-Serff et al., 1995). پرینسون عبور جریان‌های ثقلی دو بعدی از روی موانع را، به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد. نتایج او نشان داد که ارتفاع نسبی مانع تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت پیشانی³ جریان و جرم عبوری از روی مانع دارد. در حالی که هندسه مانع بر روی ویژگی‌های فوق‌الذکر تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد (Prinson, 1999).

کبزا و همکاران عبور جریان‌های دو لایه‌ای از روی دو مانع با شکل‌های متفاوت نیم‌استوانه‌ای و منشوری را بصورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که در هر دو نوع مانع چهار نوع رژیم جریان متفاوت در پایین‌دست مانع شکل می‌گیرد. این رژیم‌ها عبارتند از: 1) جریان زیر بحرانی، 2) پرش هیدرولیکی داخلی، 3) ناپایداری کلونین هلمهلتز در سطح مشترک دو

4. Shedding of billows
5. Standing billow

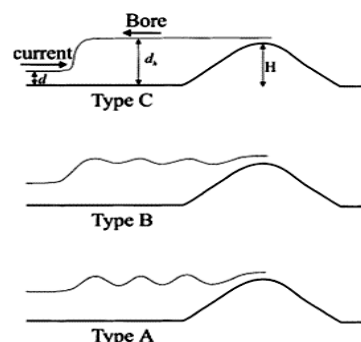
1. Density jump
2. Shear – free flow
3. Head

سیال می‌گردد، (2) رژیم II: جریان در روی تاج مانع از حالت زیربحرانی به فوق‌بحرانی تبدیل می‌شود و سپس در پایین‌دست مانع با وقوع یک پرش هیدرولیکی داخلی، رژیم جریان به زیربحرانی تبدیل می‌شود. در این رژیم مقطع کنترل بر روی تاج مانع شکل می‌گیرد. (3) رژیم III: جریان قبل از مانع از حالت زیربحرانی به فوق‌بحرانی تبدیل و مشابه رژیم II در پایین‌دست مانع با انجام پرش هیدرولیکی داخلی رژیم جریان به زیربحرانی تبدیل می‌شود. در این رژیم مقطع کنترل قبل از مانع شکل می‌گیرد. (4) رژیم IV: جریان در همه قسمت‌ها فوق‌بحرانی است و ارتفاع سطح مشترک دو سیال هنگام عبور جریان از روی مانع اندکی افزایش می‌یابد. اصغری‌پری و همکاران (1388) اثر غلظت در جریان گل‌آلود در حضور یک مانع دوزنقه‌ای شکل را بررسی کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که در جریان‌های فوق‌بحرانی اثر مانع در مقایسه با جریان‌های زیربحرانی کمتر است. ماروسی و همکاران (1388) کنترل رسوبگذاری در مخازن سدها را با استفاده از یک مانع دوزنقه‌ای شکل بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد رسوبگذاری در طول کانال بصورت نمایی کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود چگالی ورودی راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب کاهش می‌یابد. با وجود مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، بحث در زمینه برخورد جریان‌های گل‌آلود با مانع و بررسی تغییرات جریان و الگوی رسوبگذاری پیرامون مانع بسیار جوان و نوپا می‌باشد. اکثر کارهای انجام شده توسط سایر محققین در جریان‌های چگال پایستار و در شرایط کیفی بررسی شده است. مرور کارهای سایر محققین نشان می‌دهد که بررسی فیزیکی برخورد جریان گل‌آلود با موانع نیاز به مطالعات بیشتری دارد. بنابراین در این تحقیق چگونگی برخورد جریان گل‌آلود با مانع، شکل‌گیری خیزاب در بالادست مانع، تأثیر مانع بر سرعت پیشانی، مشخصه‌های متوسط عمقی و پروفیل‌های سرعت و غلظت بدنه جریان گل‌آلود بررسی شده است. علاوه بر این رژیم جریان گل‌آلود اطراف مانع نیز مشخص شده است.

2- تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق، برای تأمین سیال گل‌آلود مخزنی استوانه‌ای

موج نوع C پیشانی آشفته جریان ثقلی، موج برگشتی را شکل می‌دهد و موج برگشتی بر روی جریان نزدیک شونده حرکت می‌کند. در این نوع موج میزان اختلاط جریان چگال با سیال پیرامونی در مرز بالایی جریان، قابل ملاحظه می‌باشد. چنانچه $2 < \frac{d_h}{d} < 3$ باشد موج برگشتی نوع B خواهد بود. موج نوع B یک موج ضعیف با الگوی موج ایستا می‌باشد، که در آن قسمت جلوی موج ملایمتر بوده و حرکت موج‌گونه در قسمت پشت آن واضح می‌باشد. میزان اختلاط در قسمت پیش‌رونده این نوع موج اندک است. چنانچه $1 < \frac{d_h}{d} < 2$ موج برگشتی نوع A خواهد بود. این نوع موج متشکل از یکسری موج‌های منفرد داخلی می‌باشد و اختلاط بین دو سیال ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. شکل 1 انواع موج‌های شکل‌گرفته در بالادست مانع را بر اساس تقسیم‌بندی (Rottman and Simpson, 1989) نشان می‌دهد.



شکل 1 انواع امواج شکل‌گرفته در بالادست مانع (Simpson and Rottman, 1989)

تحقیقات Simpson (1997) نشان داد که شیب کانال پارامتر تأثیرگذاری در تعیین نوع امواج برگشتی در بالادست مانع می‌باشد. چنانچه کانال افقی باشد، امواج منعکس شده در بالادست مانع به شکل دنباله‌ای از امواج ضعیف ظاهر می‌گردد که باعث ایجاد تغییرات بسیار ملایم در عمق جریان می‌شود. با افزایش شیب کانال امواج قوی‌تری شکل می‌گیرد که تشخیص آنها ساده‌تر خواهد بود. Lawrence (1993) چگونگی عبور جریان آب‌نمک از روی مانع را در چهار رژیم مختلف تقسیم‌بندی کرد. این رژیم‌ها عبارتند از: (1) رژیم I: جریان در همه قسمت‌ها زیربحرانی است و وجود مانع باعث ایجاد ناپایداری‌های جزئی در سطح مشترک دو

سه غلظت ورودی متفاوت و در دو حالت با مانع و بدون مانع انجام شد. پروفیل‌های غلظت جریان با استفاده از روش تفرق و انعکاس امواج صوتی (ABS) محاسبه شده‌اند. اصول اساسی و پایه‌ای روش انعکاس امواج بدین صورت می‌باشد که یک پالس صوتی بوسیله سنسور مربوطه ارسال می‌گردد. هنگامی که پالس صوتی از سنسور منتشر و پخش شد، هرگونه مصالح و ذرات معلق در حجم نمونه گیری را شناسایی می‌نماید و این ذرات انرژی صوتی را منعکس می‌نماید که بخشی از آن به سنسور گیرنده منعکس می‌شود. رابطه بین شدت امواج صوتی دریافتی و مشخصات ذرات معلق بصورت رابطه (1) بیان می‌گردد (Theorne et al., 1991).

$$I = I_0 C S_f S_a \frac{e^{-2(\alpha_w + \alpha_s)}}{r^2} \quad (1)$$

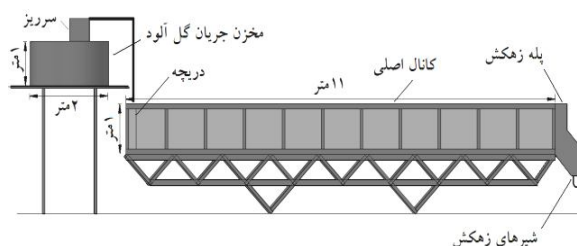
در این رابطه I_0 شدت و قدرت سیگنال ارسالی، C غلظت ذرات، α_w قابلیت جذب امواج صوتی در آب که تابعی از فرکانس، شوری و فشار می‌باشد. α_s ضریب میرایی بواسطه تفرق و پراکنش ذرات، r مسیر پخش و انتشار امواج صوتی، S_a دربرگیرنده پارامترهای مشخصه ذرات (اندازه، الاستیسیته و چگالی ذرات) و S_f در برگیرنده کلیه پارامترهای مشخصه سیستم، مثل اندازه مبدل‌های گیرنده و فرستنده، راندمان و هندسه میله اندازه‌گیری و ... می‌باشد. زمانی که فرکانس امواج صوتی Vectrino بالا است (10 مگاهرتز)، α_w تقریباً ثابت است. برای غلظت‌های کم (کمتر از 10^6) میرایی ناشی از ذرات، α_s نیز قابل صرفنظر کردن است (Kawanisi and Yokosi, 1997). بنابراین برای غلظت‌های کمتر از 10^6 و با فرض ثابت بودن توزیع دانه-بندی ذرات رابطه 1 می‌تواند به شکل رابطه (2) ساده شود (Theorne et al., 1991).

$$I \propto C \quad (2)$$

یک مرحله اساسی در تعیین غلظت، تعیین شیب خط برازش شده بین غلظت‌های اندازه‌گیری شده و انعکاس امواج صوتی می‌باشد. بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که روابط بین غلظت رسوبات معلق و شدت امواج صوتی برگشتی یک رابطه خطی به شکل رابطه (3) می‌باشد (Theorne et al., 1991).

$$C = PI \quad (3)$$

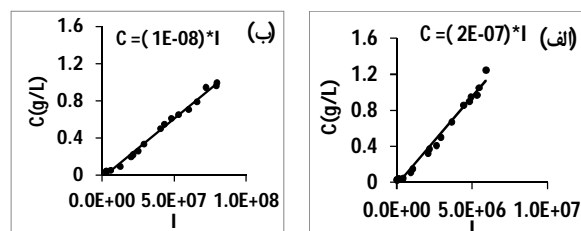
با حجم 3 متر مکعب در بالادست کانال و در ارتفاع 3/56 متری از سطح زمین نصب گردید. در داخل مخزن استوانه‌ای یک مخزن کوچکتر با ارتفاع ثابت به منظور ثابت نگه داشتن دبی در طول آزمایش تعبیه گردید. از کائولین به عنوان رسوبات معلق موجود در جریان گل آلود استفاده شد. کائولین مورد استفاده دارای چگالی مخصوص 2/65 و قطر متوسط 5 میکرون می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی مخزن سد از کانالی به طول 11 متر، عرض 0/6 متر، ارتفاع 1 متر و با شیب طولی 0/25 درصد استفاده شد. کانال در جهت طولی به دو قسمت تقسیم شده است که توسط دریچه‌ای از جنس پلکسی گلاس از یکدیگر جدا می‌شوند. قسمت کوچکتر به عنوان مخزن سیال گل‌آلود استفاده می‌شود. در ابتدای آزمایش دریچه باز می‌گردد و سیال گل‌آلود از زیر آب ساکن وارد کانال می‌شود. در انتهای پایین دست کانال پله‌ای با 20 شیر کوچک زهکش، نصب گردیده است. در واقع وجود پله و شیرهای زهکش از این لحاظ اهمیت دارند که مانع برگشت جریان گل‌آلود به سمت بالادست می‌گردد. شکل 2 نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



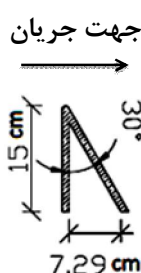
شکل 2 نمایی از کانال آزمایشگاهی

اندازه‌گیری سرعت و اطلاعات مربوط به غلظت در بدنه جریان گل‌آلود با استفاده از دو سرعت‌سنج صوتی Vectrino که به فاصله یک متر از یکدیگر قرار داشتند، در خط مرکزی کانال در شش ایستگاه متفاوت انجام شد. فاصله نقاط اندازه‌گیری شده در عمق برابر 1 سانتی‌متر بود و بر اساس ارتفاع جریان گل‌آلود بطور میانگین 30-35 نقطه در هر ایستگاه برداشت گردید. سرعت پیشانی جریان گل‌آلود توسط دوربین فیلم‌برداری Canon مدل Power Shot SD790IS محاسبه گردید. ارتفاع امواج شکل گرفته در بالادست مانع بوسیله خط‌کش‌های نصب شده در دیواره کانال اندازه‌گیری شد. در این تحقیق آزمایش‌ها با سه دبی و

$$Fr_0 = \frac{U_0}{\sqrt{gh_0}} \quad (7)$$



شکل 3 منحنی واسنجی: الف) سرعت سنج شماره 1 و ب) سرعت سنج شماره 2



شکل 4 جزئیات مانع

جدول 1 شرایط آزمایشگاهی

ارتفاع نسبی مانع $\frac{H}{h_0}$	Fr_0	Re_0	C_0 (g/L)	Q_0 (L/min)	نوع آزمایش
-	2/56	2778	3	10	بدون مانع
-	1/99	2778	5	10	بدون مانع
-	1/68	2778	7	10	بدون مانع
-	3/85	4167	3	15	بدون مانع
-	2/98	4167	5	15	بدون مانع
-	2/52	4167	7	15	بدون مانع
-	5/13	5556	3	20	بدون مانع
-	3/98	5556	5	20	بدون مانع
-	3/36	5556	7	20	بدون مانع
3/75	2/56	2778	3	10	با مانع
3/75	1/99	2778	5	10	با مانع
3/75	1/68	2778	7	10	با مانع
3/75	3/85	4167	3	15	با مانع
3/75	2/98	4167	5	15	با مانع
3/75	2/52	4167	7	15	با مانع
3/75	5/13	5556	3	20	با مانع
3/75	3/98	5556	5	20	با مانع
3/75	3/36	5556	7	20	با مانع

که P ضریب واسنجی بوده و بستگی به مشخصات عملکردی Vectrino و رسوبات داشته و توسط برازش رابطه خطی بین غلظت رسوبات و شدت انعکاس صوتی بدست می‌آید. در رابطه (3)، I براساس رابطه (4) تعیین می‌گردد (Theorne et al., 1991).

$$I \propto 10^{0.0434AMP} \quad (4)$$

یک دستگاه سرعت سنج صوتی استاندارد به‌عنوان بخشی از خروجی خود دامنه¹ (AMP) امواج صوتی را با همان فرکانس اندازه‌گیری سرعت و در همان حجم نمونه‌گیری ثبت می‌نماید. بر اساس این پیش زمینه سری زمانی دامنه-ها (AMP_3, AMP_2, AMP_1) برای هر یک از گیرنده‌ها، بوسیله رابطه زیر به سری زمانی شدت امواج صوتی برگشتی اندازه‌گیری شده تبدیل می‌گردند (Thevenot and Kraus, 1993).

$$I \propto (10^{0.0434AMP1} + 10^{0.0434AMP2} + 10^{0.0434AMP3}) \quad (5)$$

بر این اساس رابطه (3) برای تخمین غلظت رسوبات و آنالیزهای بعدی در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رویه با موفقیت توسط Thevenot and Kraus (1993) و Nikora et al. (2002) برای مطالعه دینامیک رسوبات در رودخانه‌ها و خلیج‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شکل 3 منحنی واسنجی دستگاه‌های سرعت‌سنج استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در تمام آزمایش‌های با مانع عرض مانع برابر عرض کانال اصلی و موقعیت نصب مانع در کانال در فاصله 4 متر از ورودی و بعد از ناحیه تثبیت جریان بود. جنس و شکل مانع استفاده شده در آزمایش‌ها به ترتیب پلکسی‌گلاس و مثلی بود. شکل 4 نمایی از مانعی که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

جدول 1 نشان دهنده شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. در این جدول Q_0, C_0, Re_0, Fr_0, H و h_0 به ترتیب نشان دهنده دبی ورودی، غلظت ورودی، عدد رینولدز ورودی، عدد فرود چگالی ورودی، ارتفاع مانع و ارتفاع بازشدگی ورودی می‌باشند. عدد رینولدز ورودی و عدد فرود چگالی ورودی با استفاده از روابط (6) و (7) محاسبه می‌شوند (Buckee et al., 2001).

$$Re_0 = \frac{U_0 h_0}{\nu} \quad (6)$$

1. Ampiltude

جریان در نتیجه شکل‌گیری پرش هیدرولیکی، آشفتگی جریان گل‌آلود را کاهش داده و در نتیجه ذرات معلق موجود در جریان با سرعت بیشتری ته‌نشینی می‌شود. بنابراین پرش هیدرولیکی ایجاد شده در حضور مانع می‌تواند یک مکانیزم مهم در رقیق‌سازی جریان‌های گل‌آلود باشد.

4- شکل‌گیری خیزاب در بالادست مانع

تولید آشفتگی و شکل‌گیری خیزاب از جمله تأثیرات برخورد جریان با مانع می‌باشد. خیزاب شکل گرفته در بالادست مانع پرش چگال است که لزوماً یک ناحیه فوق-بحرانی را از یک ناحیه زیربحرانی جدا نمی‌کند (Kneller and Buckee, 2000). پدیده‌های حاکم در پرش چگال افزایش ناگهانی عمق جریان و تغییر نرخ جریان می‌باشد (Ohey and Schleiss, 2007).

در تمام آزمایش‌های این تحقیق برخورد جریان گل‌آلود با مانع و شکل‌گیری امواج برگشتی در بالادست مانع با دوربین فیلم‌برداری ضبط گردیده است. هنگام شکل‌گیری امواج در بالادست مانع، ارتفاع موج برگشتی و جریان نزدیک شونده به مانع به کمک خط‌کش‌های نصب شده در کانال قرائت شده‌اند تا بتوان بر اساس تقسیم‌بندی Rottman and Simpson (1989) نوع امواج شکل گرفته در بالادست مانع را تعیین کرد. جدول 2 نوع موج شکل گرفته در شرایط هیدرولیکی مختلف با توجه به نسبت $\frac{d_h}{d}$ در دو موقعیت مختلف در بالادست مانع را نشان می‌دهد.

جدول 2 نوع امواج شکل گرفته در بالادست مانع

نوع موج	$(\frac{d_h}{d})_{x=3m}$	$(\frac{d_h}{d})_{x=2m}$	Fr_0	Re_0	C_0 (g/L)	Q_0 (L/min)
A	1/6	1/63	2/56	2778	3	10
A	1/5	1/6	1/99	2778	5	10
A	1/6	1/6	1/68	2778	7	10
A	1/65	1/54	3/85	4167	3	15
A	1/75	1/6	2/98	4167	5	15
A	1/7	1/55	2/52	4167	7	15
A	1/6	1/5	5/13	5556	3	20
A	1/65	1/7	3/98	5556	5	20
A	1/7	1/6	3/36	5556	7	20

در این روابط U_0 سرعت متوسط ورودی جریان گل‌آلود به داخل سیال محیطی، v لزجت سینماتیکی جریان گل‌آلود، و \hat{g} ثقل کاهش یافته است که اینگونه تعریف می‌شود $\hat{g} = g \frac{\rho_{mix} - \rho_w}{\rho_w}$ که در آن ρ_{mix} چگالی مخلوط ورودی، ρ_w چگالی آب صاف، و g شتاب ثقل زمین است.

3- برخورد جریان گل‌آلود با مانع

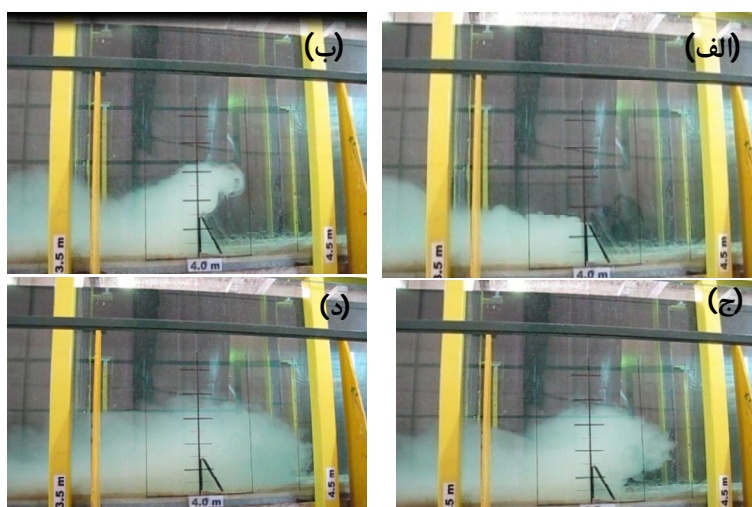
پدیده اختلاط در پیشانی جریان گل‌آلود نقش مهمی در دینامیک جریان بازی کرده و ظرفیت انتقال رسوب در مسافت‌های طولانی را کنترل می‌کند (Allen, 1971). بنابراین با توجه به اهمیت پیشانی جریان گل‌آلود در فرآیندهای فرسایش و رسوبگذاری، در این قسمت برخورد پیشانی جریان با مانع بررسی می‌گردد. شکل 5 برخورد جریان با مانع را در بازه‌های زمانی 10 ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل دبی و غلظت جریان ورودی به ترتیب 15 لیتر بر دقیقه و 5 گرم در لیتر می‌باشد. شکل 5 نشان می‌دهد هنگامی که جریان گل‌آلود به مانع برخورد می‌کند دماغه¹ در قسمت جلوی جریان ناپدید شده و انرژی جنبشی جریان به انرژی پتانسیل تبدیل شده و ارتفاع جریان به صورت موضعی افزایش می‌یابد (شکل 5-الف).

با افزایش موضعی ارتفاع جریان، بخشی از جریان از ناحیه تاج مانع به سمت بالا منحرف می‌شود، اما نیروی گرانش کاهش یافته، جریان را به سمت پایین منحرف کرده و بخشی از جریان از روی مانع عبور کرده و جریان به حرکت خود ادامه داده تا مجدداً به کف کانال برخورد کند (شکل 5-ب، ج). پیشانی جریان در فاصله 50 تا 75 سانتی‌متر پایین‌دست مانع مجدداً شکل می‌گیرد، اما جریان جدید شکل گرفته به مراتب ضعیف‌تر از جریان نزدیک شونده به مانع می‌باشد (شکل 5-د). بخش دیگری از جریان به سمت بالادست مانع منعکس شده و یک پرش چگال متحرک² (خیزاب) را شکل می‌دهد (شکل 5-د).

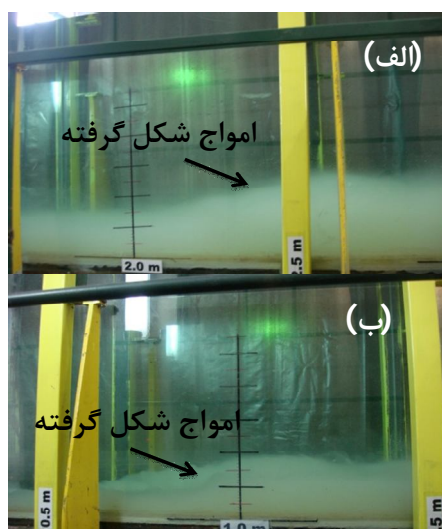
هنگام برخورد جریان گل‌آلود به مانع، آشفتگی تولید شده در پرش هیدرولیکی و درون‌آمیختگی با سیال پیرامونی، ممکن است ته‌نشینی ذرات رسوب را به تاخیر بیندازد، اما از سویی دیگر افزایش موضعی ارتفاع جریان و کاهش سرعت

1. Nose

2. Bore



شکل 5 برخورد جریان گل‌آلود با مانع در بازه‌های زمانی: الف) لحظه برخورد جریان، ب) 10، ج) 20 و د) 30 ثانیه بعد از برخورد جریان با مانع



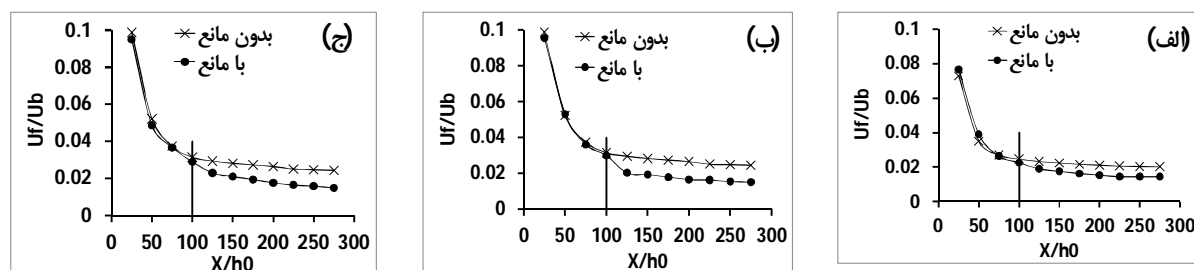
شکل 6 انتشار دنباله‌ای از امواج در مقاطع مختلف بالادست مانع: الف) مقطع 2 متر و ب) مقطع 1 متر

شکل 7 نشان می‌دهد که سرعت پیشانی جریان گل‌آلود در طول کانال بصورت نمایی تغییر می‌کند، بگونه‌ای که بیشترین افت سرعت پیشانی در بازه $25 < \frac{x}{h_0} < 75$ اتفاق می‌افتد و در بازه $75 < \frac{x}{h_0} < 275$ تغییرات سرعت پیشانی بسیار ناچیز بوده و می‌توان حرکت آن را تقریباً ثابت فرض کرد. وجود این تغییرات ناگهانی در سرعت پیشروی جریان گل‌آلود ناشی از تغییرات نیروهای وارد بر آن می‌باشد. با توجه به شیب ملایم کانال و شرایط فوق بحرانی جریان گل‌آلود در محل ورودی، در محدوده $25 < \frac{x}{h_0} < 75$ عامل رانش، نیروی اینرسی و نیروی گرانش کاهش یافته می‌باشد و نیروی اصطکاک ناچیز است.

نتایج جدول 2 نشان می‌دهد که در تمام آزمایش‌ها، امواج شکل گرفته در بالادست مانع از نوع A می‌باشند و تغییرات شرایط هیدرولیکی از جمله تغییرات عدد رینولدز و عدد فرود چگالی ورودی تأثیری در شکل‌گیری نوع امواج شکل گرفته در بالادست مانع ندارد. با توجه به اینکه در کلیه آزمایش‌های این تحقیق شیب کانال ثابت و برابر $0/25$ درصد می‌باشد، امواج شکل گرفته در بالادست مانع به شکل دنباله‌ای از امواج ضعیف است. شکل‌گیری دنباله‌ای از امواج و گسترش آن در موقعیت‌های مختلف بالادست مانع در شکل 6 نشان داده شده است.

5- تأثیر مانع بر سرعت حرکت پیشانی جریان گل‌آلود

شکل 7 روند تغییرات سرعت پیشانی جریان در حالت بدون مانع ($\frac{H}{h_0} = 0$) و یک مانع ($\frac{H}{h_0} = 3.75$) را در شرایط هیدرولیکی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی نسبت به ارتفاع بازشدگی ورودی و محور قائم نسبت به U_b بی بعد شده‌اند. در این شکل x فاصله تا ورودی جریان گل‌آلود، U_f سرعت پیشانی جریان و U_b سرعت شناوری است که به صورت $U_b = \sqrt{g_0 h_0}$ تعریف می‌گردد. لازم به ذکر است که در کلیه آزمایش‌ها ارتفاع بازشدگی ورودی ثابت نگه داشته شده است. در شکل 7 خط مستقیم در موقعیت $\frac{x}{h_0} = 100$ نشان‌دهنده موقعیت مانع در کانال می‌باشد.



شکل 7 مقایسه سرعت پیشانی جریان گل‌آلود در حالت بدون مانع و با مانع در شرایط هیدرولیکی مختلف $Q_0 = 15$ (L/min) $C_0 = 3$ (g/L) (الف)، $C_0 = 5$ (g/L) (ب) و $C_0 = 7$ (g/L) (ج)

and Linden, 1980)

$$B_0 = g_0' u_0 h_0 \quad (8)$$

6- تأثیر مانع بر مشخصه‌های متوسط عمقی

جریان گل‌آلود

6-1- ارتفاع متوسط

در جریان‌های گل‌آلود تشخیص دقیق موقعیت لبه بالایی جریان از طریق مشاهده بسیار سخت و سوال برانگیز است. ارتفاع متوسط می‌تواند یک معیار مناسب برای تخمین ارتفاع جریان گل‌آلود محسوب گردد. به منظور درک بیشتر تأثیرات مانع بر رفتار جریان، ارتفاع متوسط جریان گل‌آلود در حالت با مانع و بدون مانع در شرایط هیدرولیکی مختلف مقایسه شده است. ارتفاع متوسط \bar{h} ، و سرعت متوسط \bar{U} ، جریان گل‌آلود با استفاده از روابط (9) و (10) محاسبه می‌شوند (Ellison and Turner, 1959 ; Parker et.al., 1987).

$$\bar{h} = \frac{\int_0^\delta U dz}{\bar{U}} \quad (9)$$

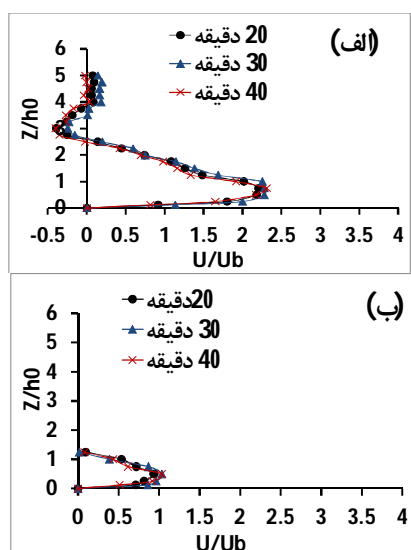
$$\bar{U} = \frac{\int_0^\delta U^2 dz}{\int_0^\delta U dz} \quad (10)$$

در این روابط U سرعت جریان در نقطه‌ای به فاصله z از بستر و δ نشان‌دهنده ارتفاعی است که در آن سرعت U برابر صفر است. برای محاسبه ارتفاع متوسط جریان از داده‌های سرعت برداشت شده توسط سرعت‌سنج صوتی Vectrino استفاده شده است. لازم به ذکر است که انتگرال‌های روابط (9) و (10) از کف کانال تا سطح مشترک دو سیال محاسبه می‌گردد. سطح مشترک دو سیال ارتفاعی در نظر گرفته شده است که مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده توسط سرعت‌سنج صوتی Vectrino، تقریباً صفر باشد بررسی‌های

با دور شدن از ورودی کانال و تبادل مومنتی که جریان چگال با سیال ساکن محیطی انجام می‌دهد، از عامل رانش کاسته شده و در نهایت تنها عامل رانش، نیروی گرانش کاهش یافته است که باعث حرکت جریان چگال می‌شود. علاوه بر این با دور شدن از ورودی کانال تأثیرات نیروی اصطکاک نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین، در ابتدا به دلیل وجود نیروی رانش بزرگتر و اصطکاک کمتر، جریان گل‌آلود شتاب و سرعت بیشتری داشته و در مناطق دورتر از ورودی، یعنی بازه $75 < \frac{x}{h_0} < 275$ ، به دلیل کم شدن نیروی رانش و افزایش تأثیرات اصطکاک از شتاب و سرعت جریان گل‌آلود کاسته می‌شود. بنابراین سرعت پیشانی جریان گل‌آلود به مقدار ثابتی میل می‌کند که نشان از عدم تغییرات نیروهای رانش و مقاوم دارد و به حالتی می‌رسد که به آن جریان تثبیت شده گویند (Tsihrintzis and Alavian, 1996). شکل 7 نشان می‌دهد سرعت پیشانی جریان گل‌آلود قبل از رسیدن به مانع، در حالت‌های با مانع و بدون مانع یکسان بوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. اما سرعت پیشانی جریان گل‌آلود پس از برخورد به مانع در مقایسه با حالت بدون مانع بطور میانگین تا 35 درصد کاهش یافته است. کاهش سرعت پیشانی جریان گل‌آلود در پایین‌دست مانع می‌تواند در نتیجه کاهش شار شناوری¹ باشد. شار شناوری جریان در حالت بدون مانع نیز به علت وجود نیروهای مقاوم و ته‌نشینی ذرات معلق ضمن پیشروی در طول کانال کاهش می‌یابد. اما وجود مانع در کانال سبب می‌شود شار شناوری بعد از مانع در مقایسه با حالت بدون مانع به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. B_0 شار شناوری اولیه است و به صورت رابطه (8) تعریف می‌گردد (Britter

1. Buoyancy flux

بدون مانع و با مانع را در شرایط هیدرولیکی مختلف نشان می‌دهد. مقادیر سرعت متوسط در بالادست مانع نسبت به حالت بدون مانع بطور میانگین تا 40 درصد کاهش یافته است، زیرا وجود مانع سبب می‌شود که ارتفاع جریان در بالادست مانع افزایش یافته و در مقابل سرعت جریان کاهش یابد و محیط مناسبی برای ته‌نشینی ذرات رسوب فراهم شود. در بالادست مانع مقدار انرژی پتانسیل جریان از روی انرژی جنبشی آن بیشتر است. ضمن عبور جریان از روی مانع مقادیر انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل دستخوش تغییر گشته و بخش عمده انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. در اثر تغییرات نوع انرژی سرعت جریان ضمن عبور از روی مانع در موقعیت $\frac{x}{h_0} = 105$ به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.



شکل 8 پروفیل‌های سرعت در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری در

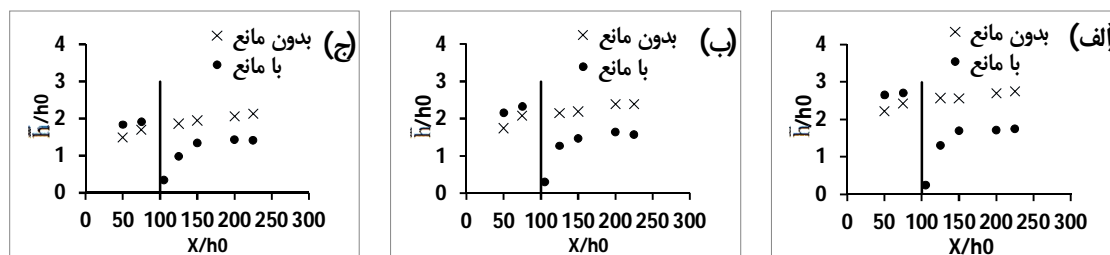
حالت با مانع (الف) $\frac{x}{h_0} = 50$ (ب) $\frac{x}{h_0} = 125$

آزمایشگاهی نشان داد که بعد از شکل‌گیری شرایط شبه پایا، برداشتها مستقل از زمان اندازه‌گیری هستند (شکل 8). در این شکل مبدا زمان اندازه‌گیری‌ها شروع آزمایش می‌باشد. داده‌های سرعت در حالت شبه پایا برداشت شده است. حالت شبه‌پایا در آزمایش‌های با مانع زمانی بوجود می‌آید که جریان گل‌آلود فضای بالادست مانع را پر کرده و از روی آن بطور پیوسته سرریز شود. چنانچه در شکل 9 مشاهده می‌گردد وجود مانع در کانال باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ارتفاع متوسط جریان شده است.

شکل 9 نشان می‌دهد ارتفاع متوسط جریان در بالادست مانع در مقایسه با حالت بدون مانع افزایش یافته است. زیرا وجود مانع بر سر راه جریان سبب بوجود آمدن حوضچه گل‌آلودی در بالادست مانع می‌گردد. این حوضچه محل مناسبی برای ته‌نشینی رسوبات و آرام کردن جریان نزدیک شونده به مانع است. بخش عمده نیروی رانش جریان ورودی در حوضچه بوجود آمده مستهلک می‌گردد. بنابراین سرعت جریان در بالادست مانع کاهش و در مقابل ارتفاع جریان افزایش می‌یابد. اما ارتفاع متوسط جریان گل‌آلود در پایین‌دست مانع بطور میانگین نسبت به حالت بدون مانع 36 درصد کاهش یافته است. در حالت بدون مانع تغییرات ارتفاع متوسط جریان در طول کانال ناچیز بوده، اما روند کلی آن مثبت است که این مسأله در نتیجه درون‌آمیختگی جریان با سیال پیرامونی می‌باشد.

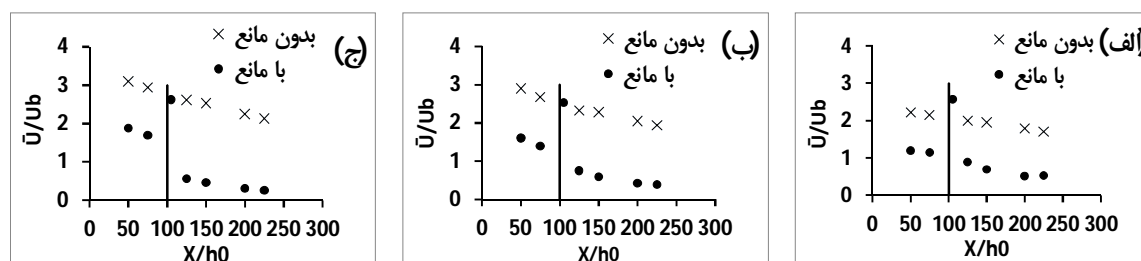
6-2- سرعت متوسط

شکل 10 روند تغییرات سرعت متوسط جریان در حالت



شکل 9 مقایسه ارتفاع متوسط جریان گل‌آلود در حالت‌های بدون مانع و بامانع در شرایط هیدرولیکی مختلف $Q_0 = 15$ (L/min)

(الف) $C_0 = 3$ (g/L)، (ب) $C_0 = 5$ (g/L) و (ج) $C_0 = 7$ (g/L)



شکل 10 مقایسه سرعت متوسط جریان گل‌آلود در حالت بدون مانع و با مانع ($Q_0 = 15$ (L/min) (الف) $C_0 = 3$ (g/L)، (ب) $C_0 = 5$ (g/L) و (ج) $C_0 = 7$ (g/L)

زیرا جریان گل‌آلود از نوع جریان‌های ناپایستار بوده و چگالی جریان در نتیجه فرسایش و رسوبگذاری در حال تغییر است. بنابراین استفاده از تئوری (Lawrence 1993) برای تعیین رژیم جریان اطراف مانع در جریان‌های گل‌آلود خالی از اشکال نمی‌باشد. اما می‌توان در جریان‌های گل‌آلود با معرفی عدد فرود چگالی محلی نوع رژیم شکل گرفته اطراف مانع را پیش بینی نمود. عدد فرود چگالی نشان دهنده نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانشی کاهش یافته است و می‌تواند نشان دهنده رفتار جریان باشد. عدد فرود چگالی محلی بصورت رابطه (11) تعریف می‌شود (Oshaghi et al., 2013).

$$Fr_{loc} = \frac{\bar{U}}{\sqrt{g'h}} \quad (11)$$

اگر $Fr_{loc} > 1$ باشد جریان فوق‌بحرانی بوده و به ازاء یک دبی ثابت عمق جریان کم و سرعت آن زیاد است. در این وضعیت جریان تنها از بالادست خود تأثیر می‌پذیرد. اگر $Fr_{loc} < 1$ باشد جریان زیربحرانی بوده و به ازاء یک دبی ثابت عمق جریان زیاد و سرعت آن کم است. در این وضعیت جریان از پایین‌دست خود تأثیر می‌پذیرد. در شکل 12 اعداد فرود چگالی محلی در حالت با مانع و بدون مانع مقایسه شده است. شکل 12 نشان می‌دهد اعداد فرود چگالی محلی در حالت بدون مانع در موقعیت‌های اندازه‌گیری شده کوچکتر از یک است. این مسأله نشان می‌دهد در حالت بدون مانع بعد از انجام پرش هیدرولیکی در محدوده $12.5 < \frac{X}{h_0} < 25$ رژیم جریان در طول کانال زیربحرانی بوده و جریان گل‌آلود در طول کانال از شرایط هیدرولیکی پایین‌دست خود تأثیر می‌پذیرد. در حالت با مانع مقدار عدد فرود چگالی محلی در موقعیت $\frac{X}{h_0} = 105$ بزرگتر از یک و در سایر مقاطع کوچکتر از یک می‌باشد.

در محدوده $\frac{X}{h_0} > 105$ بطور میانگین سرعت متوسط جریان در حالت با مانع نسبت به حالت بدون مانع 70 درصد کاهش یافته است؛ زیرا در حالت با مانع بدام افتادن ذرات معلق در حوضچه تشکیل شده در بالادست مانع، تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق در بالادست مانع و پرش هیدرولیکی مجدد در پایین‌دست مانع سبب می‌شود نیروهای رانش در مقایسه با حالت بدون مانع کاهش چشمگیری داشته باشند. در حالت بدون مانع تغییرات سرعت متوسط در طول کانال ناچیز بوده و روند کلی آن نزولی است.

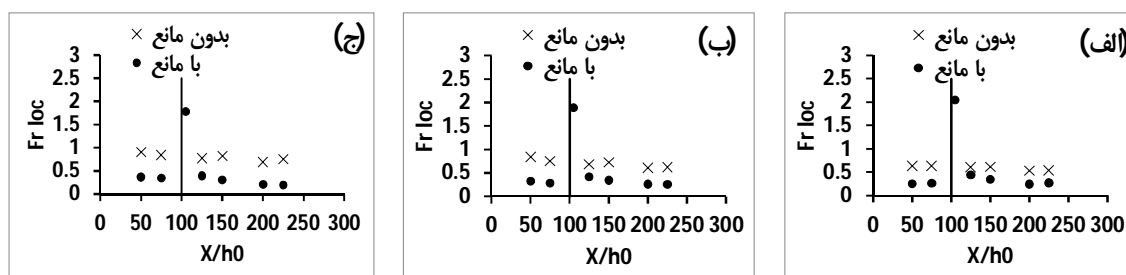
در حالت با مانع در محدوده $105 < \frac{X}{h_0} < 125$ سرعت متوسط جریان بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که می‌تواند در نتیجه شکل‌گیری پرش هیدرولیکی در این محدوده باشد. بررسی‌های مشاهداتی نیز وجود پرش هیدرولیکی در این محدوده را تایید می‌کند (شکل 11).



شکل 11 شکل‌گیری پرش هیدرولیکی در پایین‌دست مانع

7- تعیین رژیم جریان گل‌آلود اطراف مانع

فرض اساسی در کار Lawrence (1993) ثابت بودن چگالی جریان در طول مسیر بود. لازم به ذکر است که بکارگیری چنین فرضی برای جریان گل‌آلود خالی از اشکال نمی‌باشد،



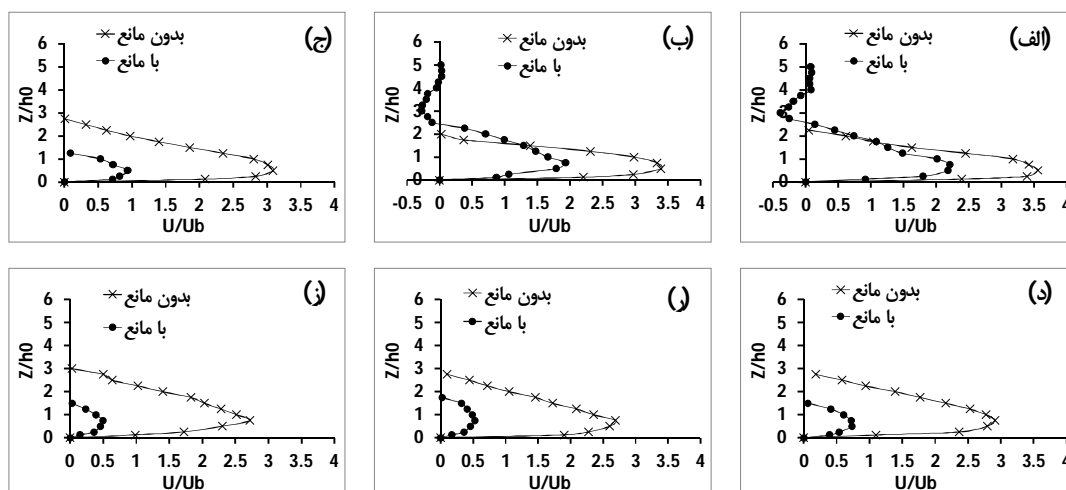
شکل 12 مقایسه عدد فرود چگالی محلی جریان گل آلود در حالت بدون مانع و با مانع در شرایط هیدرولیکی مختلف $Q_0 = 15$ (L/min) (الف) $C_0 = 3$ (g/L)، (ب) $C_0 = 5$ (g/L) و (ج) $C_0 = 7$ (g/L)

بالادست مانع سبب شکل‌گیری نواحی جدید در پروفیل سرعت شده است. این نواحی عبارتند از: (1) ناحیه دیواره؛ در این ناحیه گرادیان سرعت مثبت می‌باشد، (2) ناحیه جت؛ در این ناحیه گرادیان سرعت منفی می‌باشد. همانند حالت بدون مانع این دو ناحیه توسط سرعت ماکزیمم از یکدیگر جدا می‌شوند، (3) ناحیه جریان برگشتی؛ در این ناحیه مقادیر سرعت منفی می‌باشد، زیرا در حالت شبه پایا نیز بخشی از جریان ورودی پس از برخورد به مانع به سمت بالادست مانع منعکس شده و سبب شکل‌گیری جریانی بر خلاف جهت جریان ورودی می‌شود و (4) ناحیه‌ای در سطح مشترک دو سیال؛ مقادیر سرعت در این ناحیه بسیار ناچیز و نزدیک به صفر می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر سرعت در این ناحیه مثبت است. شکل 13 نشان می‌دهد در موقعیت‌های $\frac{X}{h_0} = 50$ و $\frac{X}{h_0} = 75$ بیشینه سرعت و مقادیر سرعت در ناحیه دیواره در حالت با مانع کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت بدون مانع داشته است. زیرا با احداث مانع در کانال ارتفاع جریان در این موقعیت‌ها نسبت به حالت بدون مانع افزایش یافته و حوضچه‌ای در بالادست مانع تشکیل می‌شود. شکل‌گیری حوضچه باعث آرام شدن جریان و در نتیجه کاهش سرعت خواهد شد. اما چگونگی تغییرات سرعت در ناحیه جت متفاوت است. در ناحیه جت پروفیل‌های سرعت در حالت بدون مانع و با مانع با یکدیگر تلاقی می‌کنند. در فاصله بین تراز سرعت بیشینه تا نقطه تلاقی، مقادیر سرعت در حالت بدون مانع بزرگتر از مقادیر سرعت در حالت با مانع است. اما در فاصله نقطه تلاقی تا انتهای ناحیه جت، مقادیر سرعت در حالت بدون مانع کوچکتر از مقادیر سرعت در حالت با مانع است.

این مسأله تأکید می‌کند که رژیم جریان ضمن عبور از روی مانع از زیرجرانی به فوق‌جرانی تغییر حالت داده و در پایین‌دست مانع، پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. جریان گل‌آلود در موقعیت $\frac{X}{h_0} = 105$ تابع شرایط هیدرولیکی بالادست و در سایر مقاطع، جریان گل‌آلود تابع شرایط هیدرولیکی پایین‌دست است. با توجه به شکل 12 می‌توان نتیجه گرفت هنگام عبور جریان از روی مانع رژیم II شکل گرفته است. علاوه بر این شکل 12 نشان می‌دهد مقادیر عدد فرود چگالی محلی در حالت با مانع به استثناء موقعیت $\frac{X}{h_0} = 105$ کوچکتر از مقادیر مشابه در حالت بدون مانع است. این مسأله نشان می‌دهد وجود مانع در کانال سبب شده است نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانش کاهش یافته، نسبت به حالت بدون مانع افت بیشتری داشته است.

8- تأثیر مانع بر پروفیل‌های سرعت بدنه جریان گل‌آلود

شکل 13 مقایسه پروفیل‌های سرعت در حالت بدون مانع و با مانع را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود نصب مانع باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پروفیل‌های سرعت در بدنه جریان گل‌آلود شده است. در ابتدا پروفیل‌های سرعت در موقعیت‌های $\frac{X}{h_0} = 50$ و $\frac{X}{h_0} = 75$ (بالادست مانع) در حالت‌های با مانع و بدون مانع مقایسه می‌شوند. شکل 13 نشان می‌دهد در موقعیت‌های مذکور پروفیل سرعت در حالت بدون مانع از دو ناحیه مختلف دیواره و جت تشکیل شده است که این دو ناحیه توسط سرعت بیشینه از یکدیگر جدا شده‌اند. اما در همین موقعیت‌ها پروفیل سرعت در حالت با مانع از 4 ناحیه مختلف تشکیل شده است. مکانیزم حرکت جریان در



شکل 13 مقایسه پروفیل‌های سرعت بدنه جریان گل‌آلود در حالت بدون مانع با مانع در موقعیت‌های مختلف $Q_0 = 15$ (L/min) و $C_0 = 5$ (g/L) (الف) $\frac{x}{h_0} = 50$ (ب) $\frac{x}{h_0} = 75$ (ج) $\frac{x}{h_0} = 125$ (د) $\frac{x}{h_0} = 150$ (ر) $\frac{x}{h_0} = 200$ (ز) $\frac{x}{h_0} = 225$ (پایین)

9- تأثیر مانع بر پروفیل‌های غلظت جریان گل‌آلود و راندمان تله‌اندازی

یکی از اهداف مهم احداث موانع در سدها کنترل حرکت رسوبات و جلوگیری از رسیدن آنها به بدنه سد و سازه‌های حساس می‌باشد. بررسی پروفیل‌های غلظت، به‌منظور شناخت فرآیندهای انتقال رسوب، اعم از فرسایش و رسوبگذاری و همچنین چگونگی عملکرد مانع بر راندمان تله‌اندازی رسوبات، لازم و ضروری است. در شکل 14 پروفیل‌های غلظت جریان، در حالت با مانع و حالت بدون مانع با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ابتدا پروفیل‌های غلظت در موقعیت‌های $\frac{x}{h_0} = 50$ و $\frac{x}{h_0} = 75$ در دو حالت با مانع و بدون مانع مقایسه می‌شوند. شکل 14 نشان می‌دهد مقادیر و ارتفاع پروفیل‌های غلظت در حالت با مانع به مقدار قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از مقادیر پروفیل‌های غلظت در حالت بدون مانع است. در حوضچه تشکیل شده در بالادست مانع سرعت جریان کم و عمق جریان زیاد است. در این شرایط عدد فرود چگالی جریان کمتر از یک (شکل 12) و جریان زیربحرانی است. با توجه به اینکه در بالادست مانع فضای مناسب برای ته‌نشینی ذرات رسوب فراهم شده است، بیشتر ذرات رسوب وارد شده به مخزن در بالادست مانع بدام افتاده و مقادیر پروفیل‌های غلظت افزایش یافته است. شکل 14 نشان می‌دهد در موقعیت‌های $\frac{x}{h_0} \geq 125$ مقادیر و

در ادامه پروفیل‌های سرعت در موقعیت‌های $\frac{x}{h_0} = 150$ ، $\frac{x}{h_0} = 200$ و $\frac{x}{h_0} = 225$ (پایین-دست مانع) در حالت‌های بدون مانع و با مانع مقایسه می‌شوند.

شکل 13 نشان می‌دهد در موقعیت‌های مذکور شکل کلی پروفیل‌های سرعت در حالت بدون مانع و با مانع مشابه هستند. بطوریکه پروفیل‌های سرعت در هر دو حالت بدون مانع و با مانع از دو ناحیه دیواره و جت تشکیل شده‌اند که توسط سرعت بیشینه از یکدیگر جدا می‌شوند. اما مقادیر سرعت بیشینه و سرعت در هر دو ناحیه دیواره و جت در حالت با مانع، کاهش چشمگیری نسبت به حالت بدون مانع داشته است. زیرا احداث مانع در کانال سبب شده است بخش عمده ذرات رسوب ورودی در حوضچه در بالادست مانع به دام افتاده و محیط مناسبی برای ته‌نشینی رسوبات فراهم گردد. با بدام افتادن ذرات رسوب در این حوضچه نیروی گرانش کاهش یافته، که جزء نیروهای رانش جریان است به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در نتیجه سرعت جریان کاهش می‌یابد. علاوه بر این پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین‌دست مانع نیز بخشی از نیروی رانش جریان را مستهلک می‌کند. بطور کلی شکل 13 نشان می‌دهد که وجود مانع سبب شده است سرعت پیشروی جریان در طول کانال در مقایسه با حالت بدون مانع کاهش یابد.

$$q_s = \int_{lb}^{h_t} c(z)u(z)dz \quad (13)$$

در این رابطه $c(z)$ و $u(z)$ بترتیب غلظت و سرعت جریان گل آلود در ارتفاع z از بستر و lb مرز پایینی و h_t مرز بالایی ناحیه بار معلق است. شکل 15 نشان می‌دهد راندمان تله-اندازی ذرات رسوب در مقاطع بالادست مانع در حالت بدون مانع بزرگتر از مقادیر مشابه در حالت با مانع است. چون در حالت با مانع با شکل‌گیری حوضچه گل‌آلود میزان ذرات رسوب بدام افتاده و غلظت آنها افزایش یافته و در نتیجه با توجه به رابطه (11) راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در بالادست مانع کاهش می‌یابد. در شکل (15-ب) مشاهده می‌شود در مقطع $\frac{x}{h_0} = 75$ مقادیر راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در حالت بدون مانع و با مانع بر هم منطبق هستند. اما چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، روند تغییرات راندمان تله‌اندازی در پایین‌دست مانع معکوس خواهد بود، به‌گونه‌ای که راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در پایین‌دست مانع به-طور میانگین 33 درصد نسبت به مقادیر مشابه در حالت بدون مانع افزایش یافته است. علاوه بر این شکل 15 نشان می‌دهد در کلیه حالت‌های با مانع راندمان تله‌اندازی رسوبات کمتر از 100% می‌باشد، زیرا بر اساس شرایط هیدرولیکی موجود بخشی از جریان ورودی از روی تاج مانع عبور کرده و به سمت پایین‌دست جریان می‌یابد.

ارتفاع پروفیل غلظت در حالت با مانع نسبت به حالت بدون مانع بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. زیرا با توجه به شرایط مناسب ته‌نشینی، بخش عمده ذرات رسوب در بالادست مانع بدام افتاده و مقدار رسوبی که همراه با جریان به سمت پایین‌دست مانع حرکت می‌کند، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

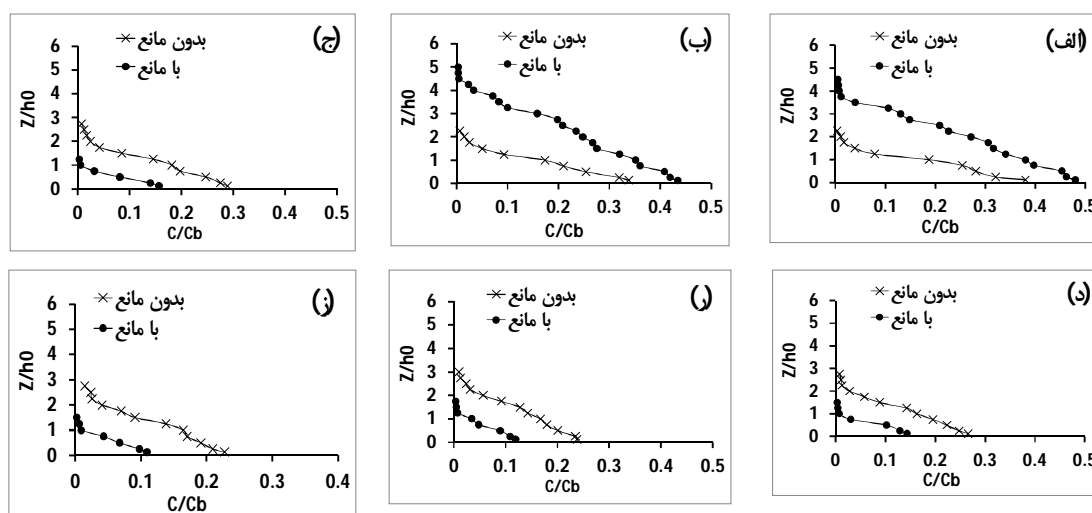
بررسی پروفیل‌های غلظت در طول کانال در هر دو حالت با مانع و بدون مانع نشان می‌دهد مقادیر غلظت ضمن حرکت جریان در طول کانال، کاهش یافته است. با توجه به اینکه تنها منبع ورود ذرات رسوب به داخل مخزن، جریان گل‌آلود ورودی می‌باشد، کاهش مقادیر غلظت ضمن حرکت جریان، ماهیت رسوبگذار بودن جریان را آشکار می‌کند.

راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در حالت‌های با مانع و بدون مانع در شرایط هیدرولیکی مختلف در شکل 15 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب بر اساس رابطه (12) تعریف می‌شود (Poesen and Verstraeten, 2000)

$$W_s = 1 - \frac{q_s}{q_{sin}} \quad (12)$$

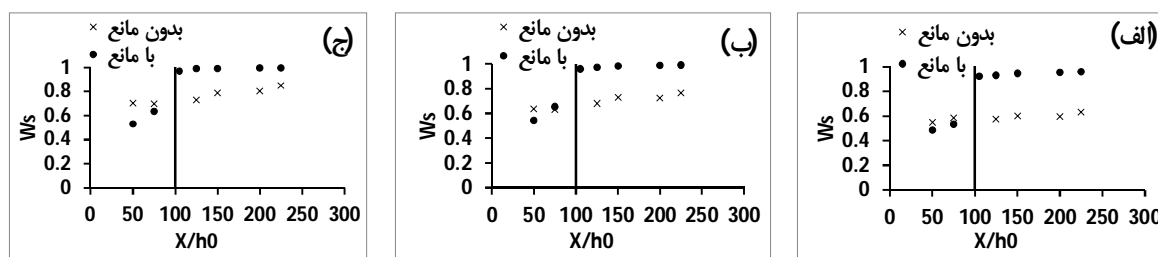
در این رابطه q_s نرخ انتقال بار معلق در مقاطع مختلف اندازه‌گیری شده و q_{sin} نرخ انتقال بار معلق ورودی می‌باشد.

نرخ انتقال بار معلق به صورت رابطه (13) تعریف می‌گردد (Bose and Dey, 2009).



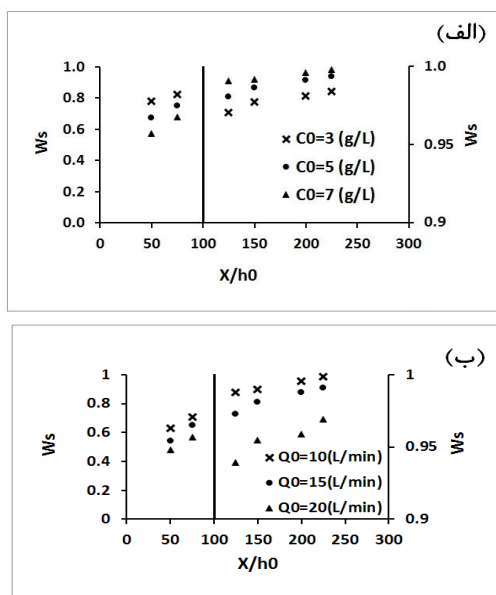
شکل 14 مقایسه پروفیل‌های غلظت جریان گل‌آلود در حالت بدون مانع و با مانع در موقعیت‌های مختلف $Q_0 = 15$ (L/min) و

$$C_0 = 5 \text{ (g/L) (الف) } \frac{x}{h_0} = 50 \text{ (ب) } \frac{x}{h_0} = 75 \text{ (ج) } \frac{x}{h_0} = 125 \text{ (د) } \frac{x}{h_0} = 150 \text{ (ر) } \frac{x}{h_0} = 200 \text{ (ز) } \frac{x}{h_0} = 225$$



شکل 15 مقایسه راندمان تله‌اندازی در دو حالت بدون مانع و با مانع در شرایط هیدرولیکی مختلف $Q_0 = 15$ (L/min) $C_0 = 7$ (g/L) (ج) و $C_0 = 5$ (g/L) (ب) و $C_0 = 3$ (g/L) (الف)

تله‌اندازی ذرات رسوب در طول کانال کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این شکل غلظت جریان ورودی ثابت و برابر 5 گرم در لیتر می‌باشد.



شکل 16 تأثیر تغییرات شرایط هیدرولیکی ورودی بر راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب: (الف) تغییرات غلظت جریان ورودی، (ب) تغییرات دبی جریان ورودی

10- نتیجه‌گیری

با توجه به نقش قابل ملاحظه مانع در کنترل پیشروی حرکت جریان‌های گل‌آلود در مخازن سدها، مکانیزم برخورد این جریان‌ها با مانع نفوذناپذیر بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تمام آزمایش‌ها، امواج شکل گرفته در بالادست مانع از نوع A می‌باشد و تغییرات شرایط هیدرولیکی از جمله

در شکل 16 تأثیر تغییرات شرایط هیدرولیکی ورودی بر راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب نشان داده شده است. برای وضوح بیشتر تأثیر تغییرات شرایط هیدرولیکی ورودی بر راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب، مقادیر مربوطه در بالادست مانع اول بر اساس محور قائم سمت چپ و در پایین‌دست مانع بر اساس محور قائم سمت راست سنجیده می‌شوند. در شکل (16- الف) دبی جریان ثابت و برابر 15 لیتر بر دقیقه می‌باشد.

چنانچه در شکل مشاهده می‌شود با افزایش غلظت جریان ورودی راندمان تله‌اندازی ذرات در بالادست مانع کاهش می‌یابد، اما روند تغییرات در پایین‌دست مانع برخلاف بالادست آن می‌باشد. زیرا با افزایش غلظت جریان ورودی ذرات رسوب بیشتری در حوضچه تشکیل شده در بالادست مانع بدام افتاده و ذرات رسوب کمتری همراه جریان به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند. در نتیجه با افزایش غلظت جریان ورودی نرخ انتقال بار معلق در بالادست مانع افزایش و در پایین‌دست آن کاهش می‌یابد. بنابراین بر اساس رابطه (12) می‌توان انتظار داشت که با افزایش غلظت جریان ورودی راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در بالادست مانع کاهش و در پایین‌دست آن افزایش یابد. لازم به ذکر است که در این شکل به منظور مقایسه صحیح، نتایج نرخ انتقال بار معلق نسبت به نرخ انتقال بار معلق پیشینه بی بعد شده است. شکل (16- ب) نشانی می‌دهد که با افزایش دبی جریان ورودی نرخ تله‌اندازی ذرات رسوب در طول کانال کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش دبی جریان ورودی، سرعت جریان افزایش می‌یابد و چنانچه غلظت جریان ثابت باشد بر اساس رابطه (13) نرخ انتقال بار معلق افزایش می‌یابد و در نتیجه بر اساس رابطه (12) راندمان

q_{sin}	نرخ انتقال بار معلق ورودی
Re_0	عدد رینولدز ورودی
r	مسیر پخش و انتشار امواج صوتی
\bar{u}	سرعت متوسط
u_0	سرعت متوسط ورودی
u_b	سرعت شناوری
u_f	سرعت پیشانی
W_s	راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب
α_s	ضریب میرایی
α_w	قابلیت جذب امواج صوتی
ρ_{mi}	چگالی مخلوط ورودی
ρ_w	چگالی آب صاف

12- منابع

اصغری پری، ا.، کاشفی پور، م.، قمشی، م. (1388). بررسی اثر غلظت جریان در کنترل جریان غلیظ با مانع در مخازن سدها، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران.

ماروسی، م.، قمشی، م.، بشاورد، ح. (1388). کنترل رسوبگذاری توسط مانع در مخازن سدها، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران.

Alexander, J., and Morris, S.A., (1994), "Observation on experimental non-channelized turbidities: thickness variation around obstacles". Journal of Sedimentary Petrology, V. 64, p. 899-909.

Allen, J. R.L., (1971). "Mixing at turbidity current heads and its geologic implications", J. Sediment. Petrol., 41: 97-113.

Britter, R. E. and Linden, P. E. (1980). "The motion of the front of a gravity current travelling down an incline", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 99, No. 3, pp. 531-543.

Bose, S. K., and Dey, S. (2009). "Suspended load in flows on erodible bed", Journal of sediment research, Vol. 24, No. 3, pp. 315-324.

Buckee, C., Kneller, B., and Peakall, J. (2001). "Turbulence structure in steady, solute-driven gravity currents, Sediment transport and deposition by particulate gravity currents", Special Publication of Int. Association of Sedimentologists, Vol. 31, pp. 173-189.

Bursik, M.I., and Woods, A.W., 2000, "The effects of topography on sedimentation from particle-laden

تغییرات عدد رینولدز و فرود چگالی ورودی تأثیری در شکل‌گیری نوع امواج شکل گرفته در بالادست مانع ندارد. سرعت پیشانی جریان گل‌آلود قبل از رسیدن به مانع، در حالت با مانع و بدون مانع یکسان بوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. اما سرعت پیشانی جریان گل‌آلود پس از برخورد به مانع در مقایسه با حالت بدون مانع بطور میانگین تا 35 درصد کاهش یافته است. ارتفاع متوسط جریان در بالادست مانع در مقایسه با حالت بدون مانع افزایش یافته است، اما ارتفاع متوسط جریان گل‌آلود در پایین‌دست مانع بطور میانگین نسبت به حالت بدون مانع 36 درصد کاهش یافته است. مقادیر سرعت متوسط نسبت به حالت بدون مانع در بالادست و پایین دست مانع بطور میانگین به ترتیب تا 40 و 70 درصد کاهش یافته است. رژیم جریان ضمن عبور از روی مانع از زیربهرانی به فوق‌بهرانی تغییر حالت داده و در پایین‌دست مانع پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. وجود مانع سبب شده است نواحی جدیدی در پروفیل‌های سرعت در بالادست مانع ایجاد شود و سرعت پیشروی جریان در طول کانال در مقایسه با حالت بدون مانع کاهش یابد. راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب در پایین‌دست مانع به‌طور میانگین 33 درصد نسبت به مقادیر مشابه در حالت بدون مانع افزایش یافته است.

11- فهرست علائم

B_0	شار شناوری اولیه
C_0	غلظت ورودی
C	غلظت ذرات
d	ارتفاع جریان نزدیک شونده
d_h	ارتفاع موج برگشتی
Fr_0	عدد فرود چگالی ورودی
g'	ثقل کاهش یافته
H	ارتفاع مانع
\bar{h}	ارتفاع متوسط
h_0	ارتفاع بازشدگی ورودی
I_0	شدت سیگنال ارسالی
P	ضریب واسنجی
Q_0	دبی ورودی
q_s	نرخ انتقال بار معلق

- obstacles”, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 133, No. 6, pp. 637-648.
- Oshaghi, M. R., Afshin, H., and Firoozabadi, B. (2013). “Experimental investigation of the effect of obstacles on the behaviour of turbidity currents”, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 40, No. 3, pp. 343-352.
- Parker, G; Garcia, M; Fukushima, Y. and Yu, W; "Experiments on turbidity currents over an erodible bed." Journal of Hydraulic Research; 25(1), 1987, 123-147.
- Prinos, P. (1999), “Two-dimensional density currents over obstacles.” Proc., 28th IAHR Congress, Graz, Austria, Theme D.
- Rottman, J. W. and Simpson, J. E., (1989), “The formation of internal bores in the atmosphere: A laboratory model”, Q. J. R. Meteorol. SOC., V. 115, pp. 941-963.
- Simpson, J. E., (1997), *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory*, 2nd edn. Cambridge University Press.
- Theorne, P. D., Vincent, C. F., Hardcastle, P. J., Rehman, S., and Pearson, N., (1991). “Measuring suspended sediment concentration using Acoustic Backscatter Devices”. Marine Geology, Vol. 98, pp. 7-16.
- Thevenot, M. M. and Kraus, N. C., (1993). “Comparison of Acoustical and optical measurements suspended material in the Cheapeake estuary”. Journal of Marine Environmental Engineering, Vol. 1, pp. 65-79.
- Tsihrintzis, V. A. and Alavian, V., (1996). “Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes.” Journal of Hydraulic Research, 34(5), 623-630.
- Verstraeten, G. and Poesen, J., (2000). Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. Physical Geography 24(2), 219–251.
- Wilkinson, D. L., and Wood, I. R., (1971), “A rapidly varied flow phenomenon in a two-layer flow”, J. Fluid Mech., V. 47, pp. 241-256.
- turbulent density currents”, Journal of Sedimentary Research, V. 70, p. 53–63
- Cabeza, C., Varela, J., Bove, I., Freire, D., Marti, A. C., Sarasua, L. G., Usera, G., Montagne, R. and Araujo, M., (2009), “Two-layer stratified flows over pronounced obstacles at low-to-intermediate Froude numbers”. Physics of Fluids 21, 044102-10.
- Chen, C. and Rottman, J. W., (1994), “Numerical simulation of upstream blocking, columnar disturbance, and bores in stably stratified shear flow over an obstacle”, American Meteorological Society, Vol. 122, pp:2506-2529.
- Ellison, T. H. and Turner, J. S; (1959), "Turbulent entrainment in stratified flows." Journal of Fluid Mechanics; 6(3), 423-448.
- Kawanisi, K. S., and Yokosi, (1997). “Measurements of suspended sediment and turbulence in tidal boundary layer”. Continental Shelf Research., Vol. 17, pp. 859-875.
- Kneller, B.C. and Buckee, C., (2000), “The structure and fluid mechanics of turbidity currents”, Sedimentology 47, 62–94.
- Lane-Serff, G. F., Beal, L. M. and Hadfield, T. D. (1995). “Gravity current flow over obstacles”, J. Fluid Mech, V. 292, pp. 39-53
- Lawrence, G.A., (1993), “The hydraulic of steady two-layer flow over a fixed obstacle”, J. Fluid Mech., V. 254, pp. 605-633.
- Middleton, G. V., (1970) “Experimental studies related to problems of Flysch sedimentation”, In Flysch Sedimentology in North America, ed, J. Lajoie, Geol. Assoc. Can. Spec. Pap. Vol. 7, pp. 253-272.
- Muck, M.T. and Underwood, M.B., (1990), “Upslope flow of turbidity currents: a comparison among field observations, theory, and laboratory methods”, Geology, 18, 54-57.
- Nikora, V. I., Goring, D. G., and Ross, A., (2002). “The structure and dynamics of the thin near-bed layer in a complex marine environment”. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 54, pp. 915-926.
- Oehy, Ch. and A. Schleiss, (2007), “Control of turbidity currents in reservoir by solid and permeable