

## پدیده‌های آشفته‌گی جریان در رسوبشویی تحت فشار با توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن سد

سهیلا توفیق<sup>۱</sup> - جمال محمد ولی سامانی<sup>۲\*</sup> - سید علی ایوب زاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

### چکیده

در رسوبشویی تحت فشار مخلوط آب و رسوب توسط مجرای تخلیه‌کننده تحتانی از مخزن سد تخلیه می‌شود و حفره‌ای از آبستتگی به شکل مخروط جلوی تخلیه‌کننده بوجود آمده و توسعه می‌یابد. در تحقیق حاضر، تأثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن و تحلیل آماری آشفته‌گی نزدیک کف در این فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایشات با عمق و دبی‌های مختلف جریان در طول‌های مختلف توسعه مجرا به منظور تعیین ژئومتری مخروط رسوبشویی طراحی و انجام گردید و برای بررسی پدیده‌های آشفته‌گی، برداشت سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر صورت گرفت. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت و محسوس توسعه مجرا در مخزن بر ابعاد مخروط رسوبشویی است، به طوری‌که توسعه به میزان ۱۰/۵ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات در مخزن موجب افزایش طول مخروط رسوبشویی به میزان ۴۸، ۸۳، ۱۱۳ درصد و افزایش حجم مخروط به میزان ۵۰، ۷۴ و ۹۶ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا می‌گردد. بررسی پدیده‌های آشفته‌گی نزدیک کف نیز نشان داد که در درون مخروط رسوبشویی احتمال وقوع پدیده‌های جاروبی و بیرون‌رانی بیشتر از پدیده‌های اندرکنش روبه بیرون و رو به داخل هستند و زاویه اعمال نیروی لحظه‌ای ناشی از این پدیده‌ها بر کف مخروط رسوبشویی با کاهش فاصله از دهانه ورودی مجرای تخلیه‌کننده کاهش و قدرت جریان افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول مجرای تخلیه‌کننده در مقاطع متناظر هم، احتمال وقوع پدیده‌های جاروبی و بیرون‌رانی افزایش و میزان زاویه اعمال نیروی متلاطم کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل کوادرات، حفره آبستتگی، زاویه اعمال نیروی متلاطم، سرعت جریان

### مقدمه

شود. یکی از راه‌حل‌های رسوب‌زدایی، انجام عملیات رسوبشویی هیدرولیکی می‌باشد که به دو نوع آزاد و تحت فشار تقسیم می‌شود (۱۴). اما از پیامدهای منفی رسوب‌گذاری در مخازن علاوه بر کاهش حجم ذخیره آن‌ها می‌توان به انسداد آبگیرها، ایجاد اختلال در کار توربین‌ها و ایجاد فشار اضافی در بدنه سد اشاره نمود که طبق تحقیقات انجام شده، رسوبشویی تحت فشار به عنوان یک روش موثر برای خارج کردن موضعی رسوبات انباشته شده در بدنه سد که محل جانمایی دریچه‌ها و توربین‌ها می‌باشد مطرح شده است. همچنین این روش مدیریت رسوب برای مناطقی که از مشکل محدودیت منابع آبی رنج می‌برند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این نوع رسوبشویی سطح آب مخزن در طول انجام عملیات رسوبشویی به گونه‌ای است که بالاتر از رقوم ارتفاعی تخلیه‌کننده تحتانی می‌باشد و مخلوط آب و رسوب به صورت تحت فشار از مخزن تخلیه می‌شوند. در این روش پس از مدتی از انجام رسوبشویی حفره‌ای از آبستتگی به شکل مخروط در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی بوجود آمده و توسعه می‌یابد (۱۴). مطالعات آزمایشگاهی مختلفی در زمینه رسوبشویی تحت فشار انجام

رسوب‌گذاری در مخازن سدها از جمله مسائل مهمی است که باید در زمینه بهره‌برداری و بحث عمر مفید آن‌ها مدنظر قرار گیرد. از این رو اهمیت افزایش عمر مفید سدها و حفظ حجم ذخیره آن‌ها برای تداوم کنترل و بهره‌برداری از منابع آب در اولویت کار برنامه‌ریزان مدیریت منابع آب کشورها قرار گرفته است. برای حفظ ذخیره‌سازی طولانی مدت در مخازن سدها رسوب‌زدایی از مخازن یک امر ضروری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد که در انتخاب روش رسوب‌زدایی و به کارگیری آن در منطقه مورد نظر می‌بایست تمام جوانب مشکل رسوب و استراتژی‌های متناسب با شرایط حاکم بر منطقه مورد نظر در جهت حل مشکل در نظر گرفته

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، استاد و دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس  
\* - نویسنده مسئول: (Email: samani\_j@modares.ac.ir)

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

حجم مخروط رسوبشویی به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که انتخاب پارامترهای موثر با توجه به اصول اولیه مهندسی رسوب و بررسی مطالعات گذشته به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$V_f = f(U_o, H_w, H_s, L_t, D_o, d_{50}, g, \rho_s, \rho_w, \nu, B)$$

که در آن،  $V_f$ : حجم مخروط رسوبشویی،  $U_o$ : سرعت جریان خروجی از مجرای تخلیه‌کننده تحتانی،  $H_w$ : ارتفاع آب داخل مخزن، بالای مرکز مجرای تخلیه‌کننده تحتانی،  $H_s$ : ارتفاع رسوبات تجمع یافته در مخزن، بالای مرکز مجرای تخلیه‌کننده تحتانی،  $L_t$ : طول مجرای توسعه داده شده در مخزن،  $D_o$ : قطر مجرای تخلیه‌کننده تحتانی،  $d_{50}$ : اندازه متوسط ذره رسوب،  $g$ : شتاب ثقل،  $\rho_s$ : چگالی رسوب،  $\rho_w$ : چگالی آب،  $\nu$ : لزجت سینماتیکی آب،  $B$ : عرض مخزن می‌باشند. پارامترهای مذکور در شکل (۱)، آمده است.

با تحلیل ابعادی پارامترهای مذکور با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج گردید:

$$\pi_1 = \frac{V_f}{H_w^3}, \pi_2 = \frac{U_o}{\sqrt{gH_w}}, \pi_3 = \frac{H_s}{H_w}, \pi_4 = \frac{L_t}{H_w}, \pi_5 = \frac{D_o}{H_w},$$

$$\pi_6 = \frac{d_{50}}{H_w}, \pi_7 = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \pi_8 = \frac{U_o H_w}{\nu}, \pi_9 = \frac{B}{H_w}$$

از پارامترهای بالا  $\pi_8 = \frac{U_o H_w}{\nu}$  بیانگر تاثیر نیروی لزجت می‌باشد و با توجه به اینکه مقدار حداقل پارامتر بدون بعد فوق در این تحقیق ۱۳۵۷۹ بدست آمده و جریان کاملاً متلاطم می‌باشد، از اثر پارامتر مذکور می‌توان صرف نظر کرد. همچنین با توجه به ثابت بودن مقادیر  $B, \rho_s, d_{50}, H_s$  در تمامی آزمایشات این تحقیق و با جایگذاری پارامترهای زیر

$$V_f^* = \frac{V_f}{H_w^3}, U^* = \frac{U_o}{\sqrt{gH_w}}, H_w^* = \frac{H_s}{H_w}, L_t^* = \frac{L_t}{H_s}$$

می‌توان پارامترهای بی بعد باقی مانده را به صورت رابطه (۲) خلاصه کرد:

$$V_f^* = \psi(U^*, H_w^*, L_t^*) \quad (2)$$

به صورت مشابه با در نظر گرفتن پارامترهای موثر موجود در رابطه (۱)، برای طول مخروط رسوبشویی، رابطه زیر بدست آمد:

$$L_f^* = \psi(U^*, H_w^*, L_t^*) \quad (3)$$

که در آن

$$L_f^* = \frac{L_f}{H_w}$$

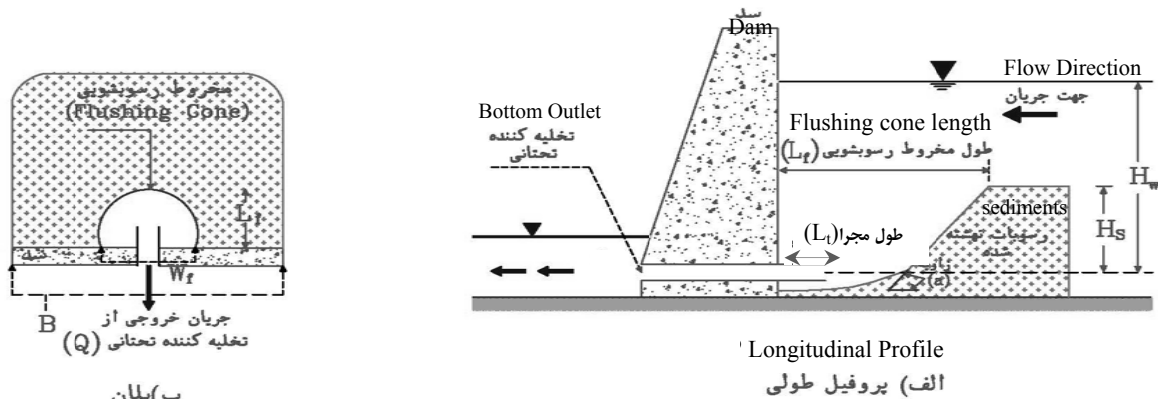
شده که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات لای و چانگ (۱۰)، اسپورلین و همکاران (۱۸)، طالب‌بیدختی و نقشینه (۱۹)، صالحی نیشابوری و همکاران (۱۷)، امامقلی‌زاده (۶ و ۷)، دولس و همکاران (۵) و اتمودجو و سرپین (۳) اشاره کرد. از مطالعه تحقیقات ذکر شده چنین استنباط می‌شود که جهت‌گیری آن‌ها بیشتر به سمت شناخت بهتر پارامترهای هیدرولیکی موثر و میزان تاثیر آن‌ها بر این فرآیند بوده است و تحقیقات محدودی در ارتباط با سایر راهکارهای افزایش عملکرد فرآیند رسوبشویی تحت فشار صورت گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. مشکاتی شه‌میرزادی و همکاران (۱۲)، با بررسی تاثیر مقاطع عرضی تخلیه‌کننده‌های تحتانی بر ابعاد مخروط رسوبشویی نتیجه گرفتند که با افزایش قطر تخلیه‌کننده تحتانی، ابعاد مخروط رسوبشویی افزایش می‌یابد. آلتوس (۸)، با قرار دادن جت آب در مخزن میزان تاثیر آن را بر میزان رسوبات تخلیه شده مورد بررسی قرار داده و بیان کرد که قرار دادن جت آب باعث افزایش رسوبات تخلیه شده از مخزن می‌شود و در حالت بدون اعمال جت آب، مدت زمان لازم برای رسوبشویی دو برابر حالتی است که جت آب در مخزن کارگذاری شده است. احد پور و همکاران (۱)، در مطالعه خود به بررسی استفاده از لرزاننده‌ها<sup>۱</sup> در لایه‌های رسوبی و محل قرارگیری آن‌ها روی ابعاد مخروط رسوبشویی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود لرزاننده در داخل رسوبات مخزن تاثیر مثبت بر ابعاد حفره رسوبشویی دارد. در تحقیق حاضر به بررسی رسوبشویی تحت فشار با توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن و تحلیل آماری آشفتگی این فرآیند که شامل استفاده از تحلیل کوادرنانت<sup>۲</sup> پدیده‌های آشفتگی<sup>۳</sup> و بررسی احتمال وقوع هر کدام از این پدیده‌ها و همچنین بررسی زاویه تاثیر آن‌ها (زاویه اعمال نیروی متلاطم ناشی از این پدیده‌ها) می‌باشد، پرداخته می‌شود. ساختار جریان متلاطم به دلیل پیچیدگی و خواص تصادفی آن، به درستی مشخص نشده است. کلین و همکاران (۹)، پدیده انفجار آشفتگی<sup>۴</sup> را در جریان متلاطم معرفی کردند و لو و ویلیامارت (۱۱)، تحلیل کوادرنانت را برای مطالعه ساختار این پدیده ارائه دادند. همچنین نزو و ناکاگوا (۱۵)، به این نتیجه رسیدند که رخدادهای حاصل از انفجار آشفتگی در انتقال ذرات رسوب کف، تاثیر بسزایی دارند. در زمینه‌های تحقیقاتی مختلفی این پدیده مورد بررسی قرار گرفته که می‌توان به تحقیقات بی و همکاران (۴)، میانایی و کشاورزی (۱۳)، اشاره کرد. این پدیده در رسوبشویی تحت فشار مورد بررسی قرار نگرفته است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

1- Vibrators

2 - Quadrant analysis

3- Bursting Events

4- Turbulence bursting



شکل ۱- معرفی پارامترهای بکار برده شده  
Figure 1- Introduction of used parameters

در تراز رسوبات ثابت ۲۰ سانتی متر نسبت به مرکز مجرا انجام گرفت. همچنین آزمایشاتی با همین شرایط هیدرولیکی در حالت بدون توسعه مجرا در مخزن انجام گردید. جدول (۱) و (۲) محدوده تغییرات پارامترها را به صورت با بعد و بدون بعد نشان می‌دهد.

جدول ۱- تغییرات پارامترهای مورد بررسی

Table 1- Values of changing parameters in this research

پارامتر مورد نظر Parameters	نماد و واحد Symbols and units	مقدار پارامتر value
ارتفاع آب مخزن روی مرکز مجرای تحتانی Water height in reservoir above the bottom outlet	$H_w$ (cm)	47.5,55,64.5
دبی جریان Discharge	$Q_o$ (L/sec)	1,2,3
طول مجرای توسعه داده شده Expansion size of the outlet channel	$L_c$ (cm)	10,20,30

جدول ۲- دامنه تغییرات پارامترهای بدون بعد

Table 2- Range of non-dimensional parameters in this research

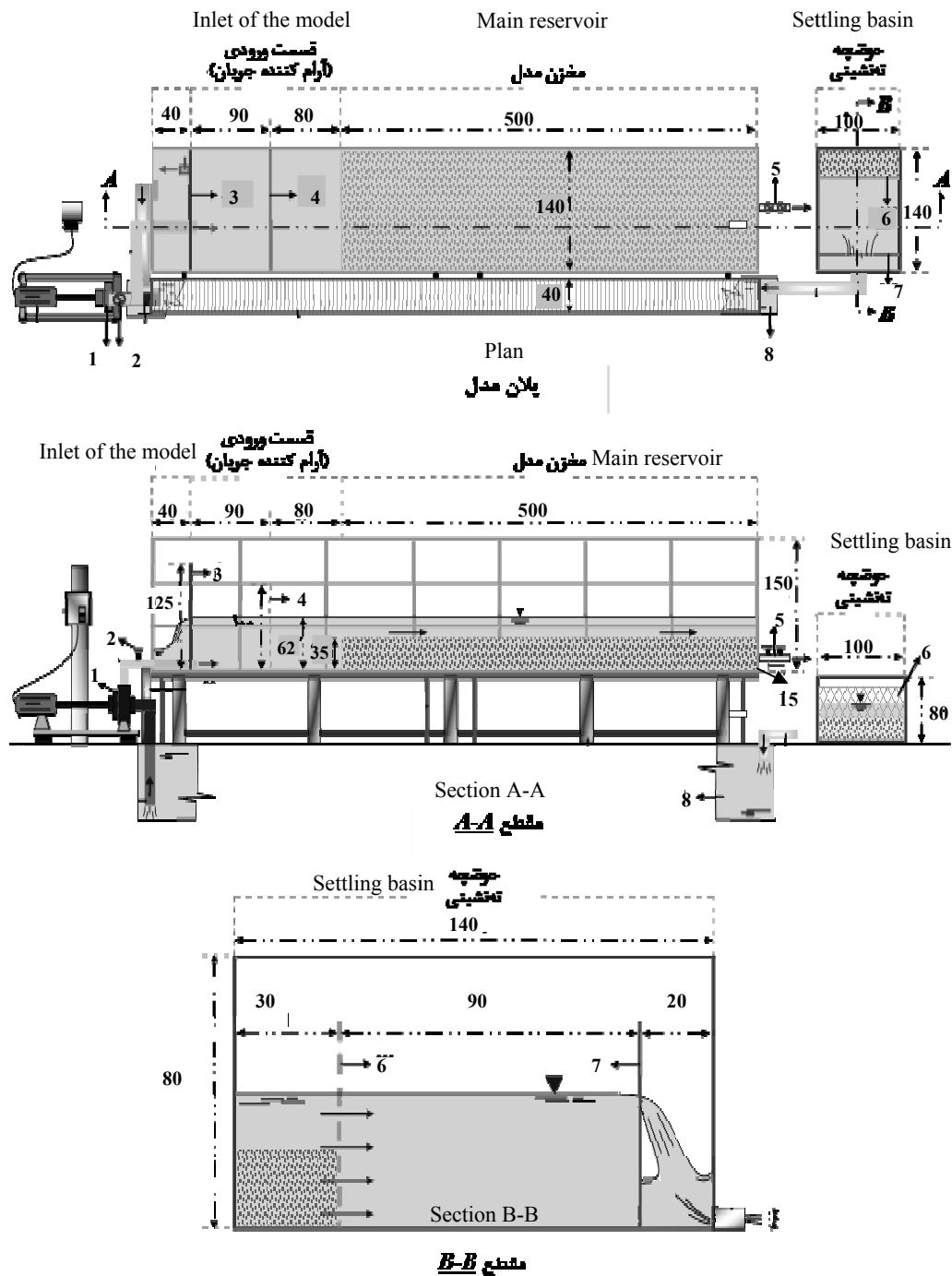
پارامترهای بی بعد non-dimensional parameters	دامنه تغییرات variation range
$V_f^*$	0.05- 0.253
$L_f^*$	0.535- 1.347
$U^*$	0.202- 0.71
$L_c^*$	0.5-1-1.5
$H_w^*$	0.31- 0.421

### مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس و در مدل فیزیکی به شکل مکعب مستطیل که دارای طول کلی ۷ متر، عرض ۱/۴ متر و ارتفاع ۱/۵ متر بوده و از ۳ قسمت، ورودی مدل، مخزن اصلی و حوضچه ته‌نشینی رسوبات تشکیل شده است انجام گردید. در قسمت ورودی مدل، تلاطم جریان ورودی با نصب یک صفحه مشبک فلزی گرفته شده و جریان به صورت آرام وارد مخزن اصلی می‌گردد. از آنجایی که در رسوبشویی تحت فشار باید در طول انجام عملیات تراز سطح آب مخزن ثابت باشد با استفاده از یک سرریز در قسمت ورودی مدل در تمام مدت انجام آزمایش ارتفاع آب داخل مخزن تنظیم می‌شد. مخزن اصلی مدل دارای طول ۵ متر، می‌باشد که رسوبات در این قسمت از مدل قرار می‌گرفت. ذرات رسوبی مورد استفاده از رسوبات غیرچسبنده از نوع سیلیس با دانه‌بندی یکنواخت و با قطر متوسط  $(d_{50})$ ، ۱/۱۵ میلی متر و انحراف معیار هندسی  $(\sigma_g)$ ، ۱/۳۷ در نظر گرفته شد. به منظور انجام رسوبشویی، یک مجرای تخلیه‌کننده از جنس پلکسی‌گلاس با مقطع دایره‌ای به قطر ۵ سانتی متر که در خط مرکزی فلوم قرار می‌گرفت، استفاده گردید. برای جمع‌آوری رسوبات تخلیه شده نیز، از یک مخزن به عنوان حوضچه ته‌نشینی رسوبات که در پایین دست مدل قرار گرفته بود، استفاده شد. همچنین برای کنترل جریان خروجی از تخلیه‌کننده، یک سرریز ۶۰ درجه مثلثی، در این قسمت مدل، نصب بود. شکل (۲)، پلان و پروفیل مدل آزمایشگاهی و جریئات آن را نشان می‌دهد.

### نحوه انجام آزمایشات

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایشات با استفاده از سه طول مجرای تخلیه‌کننده‌ی تحتانی، سه ارتفاع آب و سه دبی جریان،



۱-پمپ، ۲- شیر کنترل کننده جریان ورودی، ۳- سرریز کنترل کننده ارتفاع آب مخزن، ۴- صفحه مشبک، ۵- تخلیه کننده تختانی، ۶- صفحه مشبک، ۷- سرریز کنترل کننده جریان خروجی، ۸- مخزن اصلی تامین آب  
 1-Pump, 2-Entrance flow control valve, 3-Water level controller weir, 4-Netted plane, 5-Bottom Outlet, 6- Netted plane, 7-Output flow controller weir, 8-Water supply tank

شکل ۲ - پلان و پروفیل مدل آزمایشگاهی و جزئیات آن  
 Figure 2- schematic plan and longitudinal view of the model and its detail

برای بررسی پارامترهای آشفتگی جریان محاسبه شدند.

$$u' = u - \bar{u} \quad \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n u_i \quad (۴)$$

$$w' = w - \bar{w} \quad \bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n w_i \quad (۵)$$

در این روابط  $u'$  و  $w'$  مولفه‌های نوسانات سرعت به ترتیب در راستای جریان و در جهت عمود بر جریان و  $u$  و  $w$  به ترتیب سرعت‌های لحظه‌ای در راستای افقی و عمودی و  $\bar{u}$  و  $\bar{w}$  متوسط زمانی این سرعت‌ها می‌باشند.

## نتایج و بحث

### تأثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی بر ابعاد مخروط

#### رسوبشویی

نمودارهای شکل (۴)، حجم و طول مخروط رسوبشویی را در حالت توسعه مجرا در مخزن و حالت بدون توسعه آن را در تراز آب  $۴۷/۵$  سانتی‌متری به طور نمونه نشان می‌دهند. در این نمودارها I, II, III, IV به ترتیب حالت بدون توسعه مجرا و توسعه به میزان نسبی  $۱/۵$  و  $۱/۵$  برابر ارتفاع رسوبات در مخزن می‌باشند. با توجه به این نمودارها با افزایش توسعه مجرا، حجم و طول بی‌بعد مخروط رسوبشویی افزایش یافته است. بطوریکه با نظر گرفتن تمامی سطح آب‌های مورد آزمایش، توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی به این میزان در مخزن به طور متوسط باعث افزایش حجم مخروط رسوبشویی، به میزان  $۵۰$ ،  $۷۴$  و  $۹۶$  درصد و افزایش طول مخروط به میزان  $۴۸$ ،  $۸۳$ ،  $۱۱۳$  درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا گردیده است. نتایج حاصل از این نمودارها حاکی از آن است که توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در داخل مخزن تأثیر مثبت و محسوس بر ابعاد مخروط رسوبشویی دارد.

### انفجار آشفتگی نزدیک کف مخروط رسوبشویی

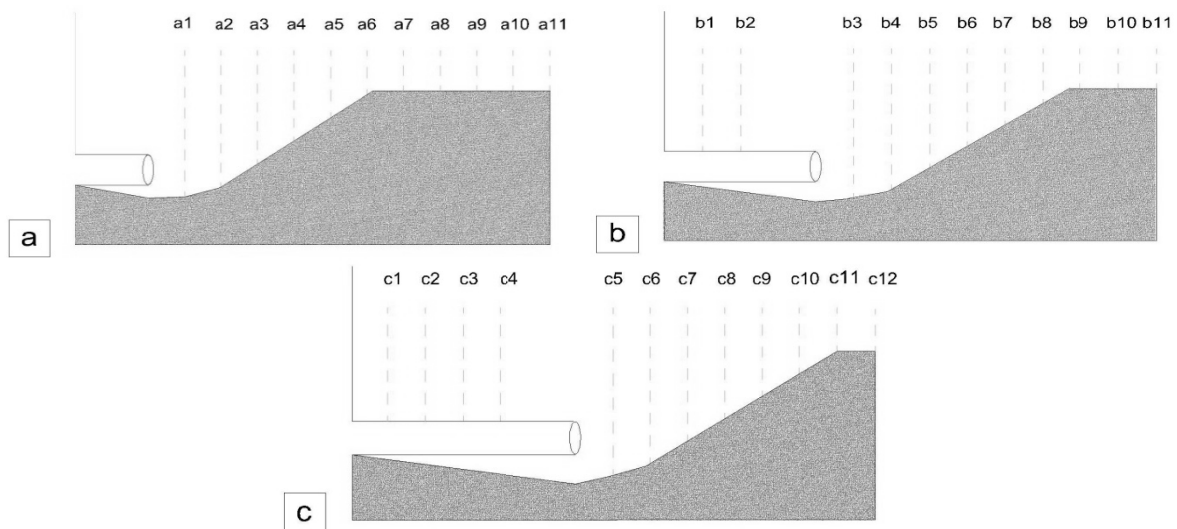
پدیده‌های آشفتگی در انفجار آشفتگی نزدیک کف (۴)، عامل اصلی نوسانات فشار نزدیک کف می‌باشند که برای بررسی مناطق مستعد آبستتگی و رسوب‌گذاری اهمیت زیادی دارند. در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل آماری آشفتگی که شامل تحلیل کوادرنانت پدیده‌های آشفتگی و احتمال ایجاد هر کدام از این پدیده‌ها و همچنین زاویه تأثیر آن‌ها می‌باشد، آمده است. برای بدست آوردن تعداد پدیده‌ها در نواحی چهارگانه و محاسبه پارامترهای فوق، برنامه کامپیوتری در نرم افزار متلب نوشته شد.

برای انجام آزمایشات، ابتدا لوله پلکسی به عنوان مجرای تخلیه‌کننده در محل خود قرار می‌گرفت. آزمایشات با روشن شدن پمپ و رسیدن ارتفاع آب داخل مدل به ارتفاع مورد نظر شروع می‌شدند. تخلیه‌کننده تحتانی باز و دبی مورد نظر برقرار می‌گردید. بعد از مدتی رسوبات تحت فشار آب با غلظت خیلی بالا از مجرای تخلیه‌کننده خارج شده (تخلیه ناگهانی) و یک حفره مخروطی شکل جلوی آن تشکیل می‌شد. مدت زمان لازم برای شکل‌گیری مخروط رسوبشویی و به تعادل رسیدن آن بستگی به عواملی مانند دبی جریان خروجی، ارتفاع آب داخل مخزن و نوع رسوبات دارد. در این تحقیق، تقریباً  $۹۰$  درصد رسوبات در  $۲۰$  دقیقه اول از زمان تخلیه ناگهانی خارج می‌گردید. با این حال تمامی آزمایشات به مدت یک ساعت بعد از زمان تخلیه ناگهانی ادامه می‌یافت تا زمانی که حفره رسوبشویی به تعادل رسیده و غلظت رسوبات خروجی از تخلیه‌کننده به حد صفر برسد. پس از تخلیه آرام و کامل آب داخل مخروط رسوبشویی تشکیل شده، با استفاده از متر لیزری با دقت  $\pm ۱$  میلی‌متر، برداشت توپوگرافی بستر مخروط رسوبشویی به صورت شبکه‌ای انجام می‌گرفت. با استفاده از اطلاعات بدست آمده، به منظور بدست آوردن حجم مخروط رسوبشویی در گزینه‌های مختلف، از نرم‌افزار Surfer10 استفاده گردید. با استفاده از این نرم‌افزار و معرفی مقاطع عرضی برداشت شده به آن، حجم رسوبات خروجی از مخزن بدست می‌آمد.

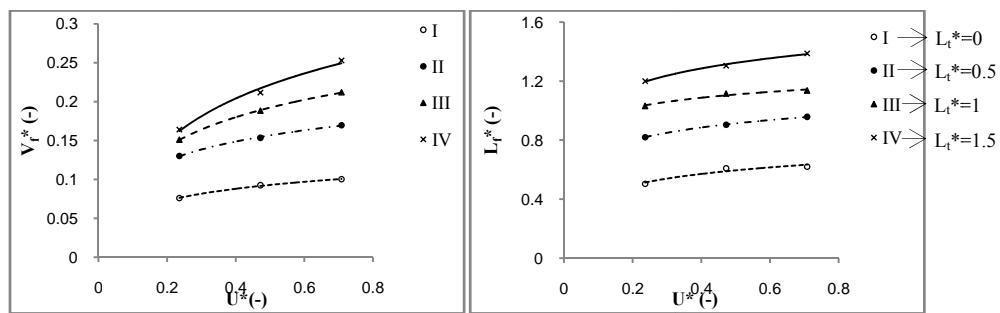
برای بررسی پارامترهای آشفتگی، بعد از به تعادل رسیدن مخروط رسوبشویی، برداشت سرعت جریان در فاصله‌ای مناسب از کف مخروط و در محور میانی مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در دبی خروجی  $۳$  لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب مخزن  $۴۷/۵$  سانتی‌متر، برای سه طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی  $۱۰$ ،  $۲۰$  و  $۳۰$  سانتی‌متر، انجام گردید. مقاطع مختلف برداشت سرعت در آزمایشات مذکور در شکل (۳)، آمده است. اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر<sup>۱</sup> با نرخ داده‌برداری  $۲۰۰$  نمونه در ثانیه صورت گرفت. دستگاه مذکور توانایی اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای جریان را در سه جهت دارا می‌باشد (سرعت در جهت  $x, y, z$  به ترتیب  $u, v, w$  می‌باشد). داده‌های برداشتی طبق توصیه شرکت سازنده دستگاه (۱۶)، برای داشتن نتایج دقیق در هر نقطه، با همبستگی زیر  $۷۰$  درصد و نسبت سیگنال به نویز<sup>۲</sup>، زیر  $۱۷$  حذف شدند و سری زمانی سرعت‌ها با داده‌های منطقی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. بدین صورت که بعد از برداشت سرعت‌های لحظه‌ای با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج، مولفه‌های نوسانات سرعت در راستای جریان و در جهت عمود بر آن با استفاده از روابط (۴ و ۵)،

1- Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

2- Signal/Noise Ratio (SNR)



شکل ۳- محورهای برداشت سرعت  
Figure 3- Sections of velocity measurement



شکل ۴- تاثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی بر حجم و طول مخروط رسوبشویی  
Figure 4- Effect of expanding bottom outlet channel in volume and length of flushing cone

است.

بر اساس تحقیقات پیشین، پدیده جاروبی باعث حرکت ذرات بصورت بار بستر و پدیده بیرون‌رانی باعث انتقال ذرات بصورت بار معلق می‌شوند و همچنین در مناطقی که پدیده‌های اندرکنش رو به داخل و رو به بیرون غالب باشند ته‌نشینی رسوبات اتفاق می‌افتد (۱۴). در شکل (۶)، توزیع نوسانات سرعت در ۴ ناحیه فوق در حالتی که میزان توسعه مجرا در مخزن ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد، در مقاطع مختلف برداشت سرعت آمده است.

**بررسی احتمال وقوع هر کدام از پدیده‌های چهارگانه و روند تغییرات آن در راستای محور مرکزی مجرا**

بر اساس نوسانات سرعت دو بعدی احتمال وقوع هر کدام از پدیده‌های چهارگانه برای هر ناحیه به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$P_k = \frac{n_k}{N} \quad N = \sum_{k=1}^4 n_k \quad (۶)$$

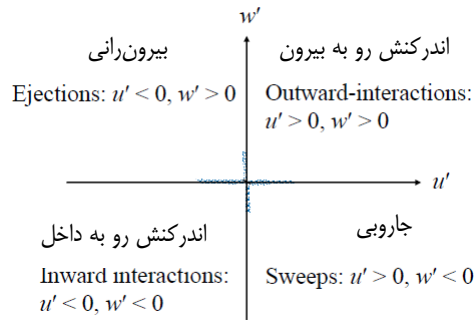
### تحلیل کوادرنات نوسانات سرعت نزدیک کف

فرآیند انفجار آشفته‌گی کف، شامل ۴ گروه از پدیده‌ها می‌باشد. این گروه‌ها با در دست داشتن نوسانات سرعت که در قسمت‌های قبلی، نحوه محاسبه آن ارائه گردید، بوسیله ناحیه‌ای از هر پدیده به صورت زیر تعریف می‌شوند.

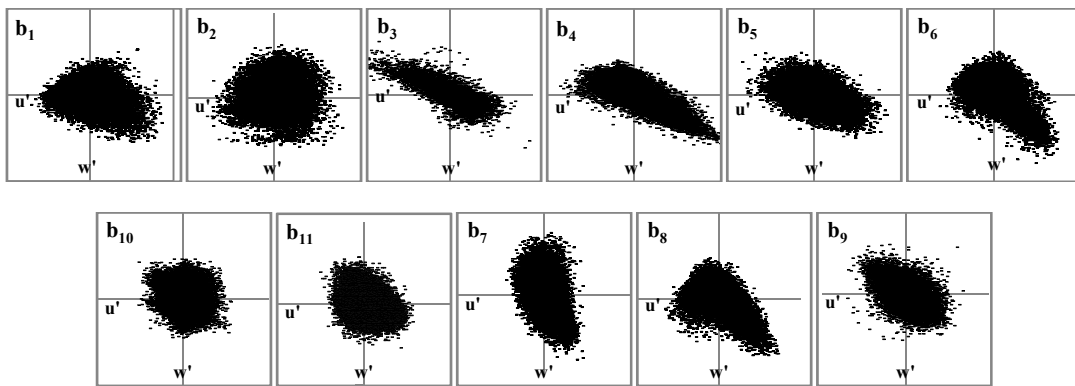
- ناحیه ۱، پدیده اندرکنش روبه بیرون  $(u' > 0, w' > 0)$
- ناحیه ۲، پدیده بیرون‌رانی  $(u' < 0, w' > 0)$
- ناحیه ۳، پدیده اندرکنش روبه داخل  $(u' < 0, w' < 0)$
- ناحیه ۴، پدیده جاروبی  $(u' > 0, w' < 0)$ .

این ۴ ناحیه بر اساس نوسانات سرعت در شکل (۵)، آورده شده

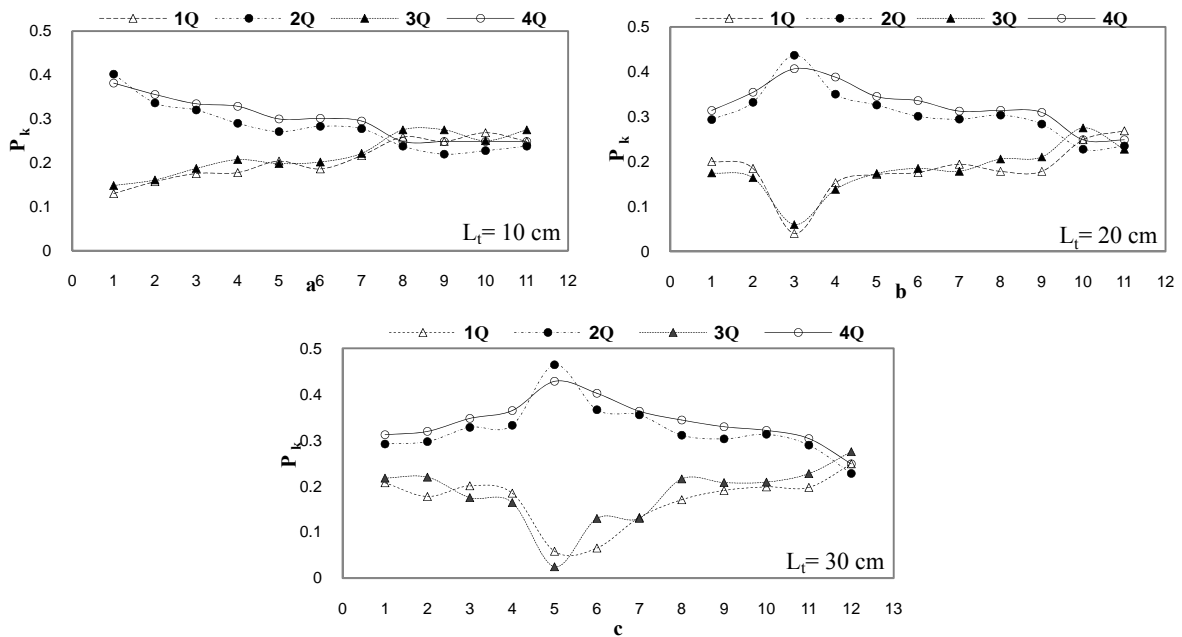
- 1- Outward Interaction
- 2- Ejection
- 3- Inward Interaction
- 4- Sweep



شکل ۵- انواع پدیده های آشفتگی جریان و ناحیه مربوط به هر کدام  
Figure 5- Four class of bursting events and their associated quadrants



شکل ۶- توزیع نوسانات سرعت در ۱۱ مقطع در  $L_t/H_s=1$  ( $L_t=20$  cm)  
Figure 6- Distribution of instantaneous velocity fluctuations at  $L_t/H_s=1$  ( $L_t=20$  cm) for 11 sections



شکل ۷- احتمال وقوع هر کدام از پدیده های آشفتگی  
Figure 7- Occurrence probability of bursting events

بررسی قرار داد زاویه اعمال نیروهای ناشی از این پدیده‌ها و روند تغییر آن‌ها در کف مخروط رسوبشویی می‌باشد. جهت محاسبه زاویه اعمال نیروها از رابطه زیر استفاده گردید.

$$\gamma_i = \frac{1}{n_i} \sum_{t=0}^T \arctg\left(\frac{w'_{it}}{u'_{it}}\right) \quad (7)$$

$w'_{it}$  و  $u'_{it}$  نوسانات سرعت عمود و مماس بر سطح مخروط رسوبشویی مربوط به پدیده  $i$  و  $n_i$ : تعداد هر کدام از پدیده‌ها می‌باشند. از آنجایی که پدیده‌های غالب در فرآیند مورد بررسی، پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی بوده اند، زاویه اعمال این پدیده‌ها محاسبه و مورد بررسی قرار گرفتند.

با کاهش زاویه اعمال پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی نسبت به بستر، مولفه نیروی لحظه‌ای بیشتری از طرف سیال به ذرات رسوب برای خارج کردن ذرات از محل استقرارشان وارد شده و در نتیجه در این مناطق احتمال فرسایش بیشتر است. شکل (۸)، تغییرات این زوایا را در سه طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل روند تغییرات زوایا برای هر دو ناحیه ۲ و ۴ تقریباً به یک شکل می‌باشد. با توجه به این شکل و شکل (۳) با کاهش فاصله از دهانه ورودی مجرای تخلیه‌کننده تحتانی زاویه اعمال نیروی لحظه‌ای ناشی از پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی بر کف مخروط رسوبشویی کاهش می‌یابد و حداقل این زوایا در محل حداکثر عمق آبستنگی که محل آن درست در محور مقابل دهانه ورودی مجرا می‌باشد اتفاق می‌افتد که نشانگر افزایش قدرت جریان جهت شستن رسوبات در این قسمت می‌باشد. همچنین همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش طول مجرای تخلیه‌کننده، میزان این زوایا در مقاطع متناظر هم کاهش یافته است.

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر تاثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در رسوبشویی تحت فشار، همچنین پارامترهای آشفته‌گی این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که توسعه مجرا در مخزن تاثیر مثبت و محسوس بر ابعاد مخروط رسوبشویی دارد و با افزایش میزان توسعه، ابعاد مخروط رسوبشویی افزایش می‌یابند، بطوریکه توسعه به میزان نسبی ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات در مخزن باعث افزایش حجم مخروط رسوبشویی، به میزان ۵۰، ۷۴ و ۹۶ درصد و افزایش طول مخروط به میزان ۴۸، ۸۳، ۱۱۳ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا می‌گردد.

در رابطه بالا،  $P_k$ : احتمال وقوع هر کدام از پدیده‌های چهارگانه،  $n_k$ : تعداد هر کدام از پدیده‌ها و  $N$ : تعداد کل پدیده‌ها می‌باشد. طبق رابطه بالا احتمال هر ناحیه در هر نقطه محاسبه گردید.

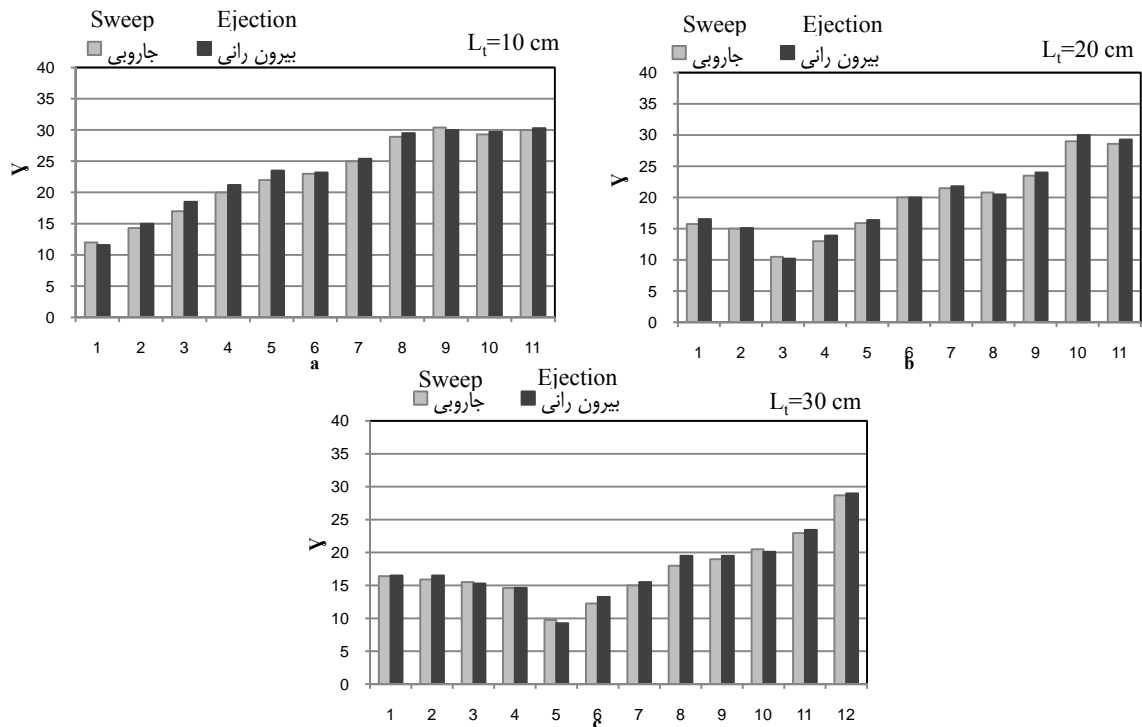
شکل (۷)، نشان دهنده‌ی احتمال وقوع هر کدام از پدیده‌های آشفته‌گی در نقاط نزدیک کف مخروط رسوبشویی، در مقطع میانی مجرای تخلیه‌کننده تحتانی به تفکیک طول مجرای توسعه داده شده در مخزن می‌باشد. در این شکل‌ها  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  بترتیب نشان‌دهنده پدیده‌های اندرکنش رو به بیرون، بیرون‌رانی، اندرکنش رو به داخل و جارویی می‌باشند.

شکل‌های مذکور، نشان می‌دهند که در نزدیک‌ترین محور به دهانه ورودی مجرای تخلیه تحتانی (در هر سه طول)، که حداکثر عمق مخروط رسوبشویی در محورهای برداشت سرعت، در این محور اتفاق می‌افتد، احتمال ایجاد پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی بیشترین مقدار خود و پدیده‌های اندرکنش رو به بیرون و اندرکنش رو به داخل کمترین مقدار را دارا هستند. البته پدیده غالب در این نقطه پدیده بیرون‌رانی می‌باشد که در مشاهدات آزمایشات نیز دیده می‌شد که ذرات رسوب بدلیل وجود گردابه در این محل به صورت بار معلق به داخل مجرا انتقال می‌یافتند. با افزایش فاصله از دهانه ورودی مجرا احتمال وقوع پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی رو به کاهش است، در حالیکه احتمال پدیده‌های اندرکنش رو به بیرون و اندرکنش رو به داخل افزایش می‌یابد. ولی باز این دو پدیده، پدیده‌های غالب آشفته‌گی در این نقاط می‌باشند. در واقع می‌توان گفت علت کاهش عمق آبستنگی با افزایش فاصله از دهانه ورودی مجرا کاهش احتمال پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی در این نقاط می‌باشد. همانطور که در شکل‌ها نیز مشخص است در این نقاط پدیده جارویی نسبت به پدیده بیرون‌رانی احتمال وقوع بیشتری دارد و مهم‌تر است. که مشاهدات نیز موید انتقال ذرات رسوب در این نقاط به صورت بار بستری بود. نهایتاً جای می‌رسد که احتمال هر چهار پدیده تقریباً برابر می‌شود و این نقاط، مناطقی هستند که مخروط رسوبشویی به سطح ابتدایی قرارگیری رسوبات می‌رسد که آبستنگی و یا رسوب‌گذاری در آن‌ها اتفاق نمی‌افتد. در مقایسه این نمودارها نیز مشاهده می‌شود که با افزایش طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مقاطع متناظر هم، احتمال ایجاد پدیده‌های جارویی و بیرون‌رانی افزایش یافته است. بطوری‌که در نمودارهای بالا مشخص است در محل حداکثر عمق مخروط رسوبشویی، احتمال پدیده بیرون‌رانی در طول مجرای ۱۰ سانتی‌متر ۰/۳۹ و در طول‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۷ می‌باشند.

### بررسی زوایای تاثیر پدیده‌های آشفته‌گی نزدیک کف

پارامتر دیگری که می‌توان در مورد پدیده‌های آشفته‌گی مورد





شکل ۸- تغییرات زاویه تاثیر نیروی لحظه‌ای ناشی از پدیده‌های بیرون رانی و جارویی نزدیک کف  
 Figure 8- The variation of impact angle of moment force due to sweep and ejection

ناشی از پدیده‌های جارویی و بیرون رانی بر کف مخروط رسوبشویی کاهش و قدرت جریان افزایش می‌یابد و حداقل این زوایا در محل حداکثر عمق مخروط رسوبشویی اتفاق می‌افتد و با افزایش طول مجرای تخلیه کننده میزان این زوایا در مقاطع متناظر هم مقداری کاهش می‌یابد. در نتیجه یکی از عوامل افزایش ابعاد مخروط رسوبشویی با افزایش میزان توسعه مجرای تخلیه کننده تحتانی در مخزن را می‌توان افزایش احتمال وقوع این پدیده‌ها و کاهش زاویه اعمال نیروی متلاطم ناشی از آن‌ها دانست.

بررسی پدیده‌های آشفتنی نزدیک کف نشان داد که در درون مخروط رسوبشویی احتمال وقوع پدیده‌های جارویی و بیرون رانی بیشتر از پدیده‌های اندرکنش روبه بیرون و رو به داخل هستند. در محل حداکثر عمق مخروط رسوبشویی پدیده بیرون رانی و در مقاطع دیگر پدیده جارویی پدیده‌های غالب می‌باشند و با افزایش طول مجرای تخلیه کننده تحتانی در مقاطع متناظر هم، احتمال وقوع پدیده‌های جارویی و بیرون رانی افزایش می‌یابند. همچنین بررسی زاویه اعمال نیروی لحظه‌ای نشان داد با کاهش فاصله از دهانه ورودی مجرای تخلیه کننده تحتانی، زاویه اعمال نیروی لحظه‌ای

## منابع

- 1-Ahadpour Dodaran A., Park S., Mardashti A., and Noshadi M. 2012. Investigation of dimension changes in the under pressure hydraulic sediment flushing cavity in storage dams under the effect of localized vibrations in the sediment layers. *International Journal of Ocean System Engineering*, 2(2):71-82.
- 2-Annandale G. 2006. *Scour Technology*. McGraw Hill. New York.
- 3-Atmodjo P.S., and Suripin. 2012. The effect of water level on the effectiveness of sediment flushing. *Internat. J. Waste of Resources*, 2(2):20-31.
- 4-Bey A., Faruque M.A.A., and Balachandar R. 2008. Effects of varying submergence and channel width on local scour by plane turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 46(6):764-776.
- 5-Dewals B.J., Brasseur N., Erpicum S., Archambeau P., and Pirotton M. 2009. Flushing with limited sediment availability. P.4289-4296. 33<sup>rd</sup> Iahr Congress: Water Engineering For A Sustainable Environment, 9-14 August.

2009. International Association of Hydraulic Engineering & Research. Iahr., Vancouver, Canada.
- 6-Emamgholizadeh S., Bina M., Fathi-Moghadam M., and Ghomeysi M. 2006. Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir. *Arpn Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4):7-16.
- 7-Emamgholizadeh S. 2008. The Experimental investigation of the effects of pressure flushing on flushed sediment through storage reservoir. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(4): 219-234. (in Persian with English abstract)
- 8-Jenzer Althous J.M.I. 2011. Sediment evacuation from reservoir through intake by jet induced flow. Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Switzerland.
- 9-Kline S. J., Reynolds W.C., Schraub F.A., and Runstadler P.W. 1967. The Structure of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mech*, 30(4):743-773.
- 10-Lai J.S., and Chang F. 2001. Physical modeling of hydraulic desiltation in tapu reservoir. *International Journal of Sediment Research*, 16(3):363-379.
- 11-Lu S.S., and Willmarth W.W. 1973. Measurements of the structures of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mech*, 60(3):481-511.
- 12-Meshkati Shahmirzadi M.E., Dehghani A.A., Sumi T., Mosaedi A., and Meftah H. 2010. Experimental investigation of pressure flushing technique in reservoir storages. *Journal of Water and Geoscience*, 1(1):132-137.
- 13-Mianaei S.J., And Keshavarzy A.R. 2008. Spatio-Temporal variation of transition probability of bursting events over the ripples at the bed of open channel. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 22:257-264.
- 14-Morris G.L., and Fan J. 2009. *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw Hill. New York. Electronic Version.
- 15-Nezu I., and Nakagawa H. 1993. *Turbulence in open channel flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam.
- 16-Nortek. 2005. *ADV Users Manual*. Nortek As, Norway.
- 17-Salehi Neyshabour S.A.A., Kholami Aalm I., and Daemi A.R. 2006. Study the effect of some parameters affecting the design and the performance the outlet channel. *Journal of Modares Civil Engineering*, 21:23-35. (in Persian with English abstract)
- 18-Scheuerlein H., Tritthart M., and Nunez Gonzalez F. 2004. Numerical and physical modeling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs. p. 245-254. Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures. 2004. Tehran, Iran.
- 19-Talebbeydokhti N., and Naghshineh A. 2004. Flushing sediment through reservoirs. *Iranian Journal of Science & Technology; Transaction B*, 28(B1):119-136.

## Bursting Events in Pressure Flushing with Expanding Bottom Outlet Channel within Dam Reservoir

S. Tofghi<sup>1</sup> - J.M.Vali Samani<sup>2\*</sup> - S.A. Ayyoubzadeh<sup>3</sup>

Received: 04-02-2014

Accepted: 14-03-2016

**Introduction:** Currently, large dams in the world, due to the high amount of sediments in the reservoir, especially around the intake, have operational problems. One of the solutions for this problem is pressure flushing. In this type of flushing, a mixture of water and sediment is removed from bottom outlets form dam reservoir and a funnel shaped crater is created in the vicinity of the outlet opening. In laboratory experiments carried out in this study, pressure flushing with the expansion of bottom outlet within the reservoir and its statistical analysis of bursting events were investigated. The structure of the turbulent flow is not fully understood due to their complexity and random nature. *Klein et al.* Introduced the turbulence bursting in this kind of flow and *Nezo and Nakagora* suggested that the events resulting from turbulence bursting has a significant effect of transferring the sediment particles.

**Materials and Methods:** For the purposes of this study, the experiments were conducted with a physical model with 7m length, 1.4m width, and 1.5m height, consisting of three parts namely the inlet of the model, the main reservoir, and settling basin. The main reservoir of the model was 5m long and the sediments were placed within this part of the model. The sediment particles were non-cohesive silica with uniform size and with median diameter ( $d_{50}$ ) 1.15mm and geometrics standard deviation ( $\sigma_g$ ) 1.37. Experiments carried out with different discharges and water depths above the bottom outlet in different expansion size of outlet channel in constant sediment level of 20cm above the center of the outlet channel. The model was slowly filled with water until the water surface elevation reached to a desired level. The bottom outlet was manually opened, after a while sediment were discharged with the water flow in very high concentrations through the outlet channel (sudden discharge) and a funnel shaped crater was formed in front of it. After the run of each experiment, the bed level of scouring was measured using laser meters, and the volume of flushing cone was calculated by Surfer software. For investigation of turbulence parameters, the measurement of flow velocity in 0.5cm from the bed of flushing cone in the central axis of the outlet channel in the flow rate of 3 liters per second and water level of 47.5cm for three expansion sizes of the outlet channel (10, 20, and 30cm) was performed. The flow velocity measurement was done using an Acoustic Doppler Velocimeter. This device is capable of measuring instantaneous velocity in three directions.

**Results and Discussion:** The results indicated that the relative amount of bottom outlet channel expansion for 0.5, 1 and 1.5 times height of the sediments in the reservoir, leads to increase in flushing cone length for an average of 48, 83 and 113% and flushing cone volume for the average amount of 50, 74 and 96% compared to the case when the outlet channel is not developed. Also the analysis of the turbulence parameters showed that in the nearest axis to the inlet of the bottom outlet channel in which the maximum depth of flushing cone, the occurrence probability of sweep and ejection are maximum and impact angle of moment force due to these events is minimized. However the dominant event here is ejected which was also observed in laboratory experiments the particles were transferred into the channel as suspended load. By increasing the distance from the inlet opening of the channel the occurrence probability of sweep and ejection are decreased and impact angle of moment force due to these events is increased, but again, these two events are the dominant events in this regions and sweep is more important than ejection, that the observations also verify the particles transferred as bed load in these region. Ultimately, it comes to a region where the probabilities of all four events are the same and where the sediment flushing cone reaches the primary sedimentation level that scouring and sedimentation don't take place there. By increasing the expansion size of the bottom outlet channel, the occurrence probability of sweep and ejections are increased and impact angle of moment force due to these events is decreased. So that at the place of the maximum depth of flushing cone, the probability of ejection in 10cm outlet channel is 0.39 and for 20 and 30cm outlet channels corresponds to 0.44 and 0.47, respectively.

**Conclusions:** In this study, the effect of expansion of bottom outlet channel within reservoir and its statistical

1, 2 and 3- M.Sc Graduated Student, Professor and Associate Professor of Water Structures Engineering Department, Tarbiat Modares University

(\*-Corresponding Author Email: samani\_j@modares.ac.ir)

analysis of bursting events was investigated. Results showed that, expansion of bottom outlet channel within the reservoir has positive and tangible effects on the size of the flushing cone and quadrant analysis of bursting events showed that the occurrence probability of sweep and ejection are greater than other events in the bed of flushing cone. Also with increasing in the expanding size of outlet channel, occurrence probability of dominant events is increasing and impact angle of turbulent force is decreasing. In fact it can be said that, the factors that cause increased dimensions of the flushing cone with the expansion of the bottom outlet channel within the reservoir are the increase of the occurrence probability of sweep and ejection events and decrease of impact angle of turbulent force to these events.

**Keywords:** Flow Velocity, Impact Angle of Turbulent Force, Quadrant Analysis, Scour Hole