

# جریان شستشوی رسوب در روزنه های بزرگ: یک تحقیق تجربی

## چکیده

به دلیل محدودیت و موقعیت یابی جریان توسط روزنه ها، این سازه های هیدرولیک معمولاً در سدها و مخزن نگه داری آب برای شستشوی رسوبات استفاده میشوند. در این تحقیق، ویژگی جریان بالا دستی در یک روزنه گرد بزرگ قرار گرفته در مخزن آب بررسی شده است که در این مورد، رسوبات در پشت آن جمع شده اند. آزمایشات انجام شده برای این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان و در یک مخزن مستطیلی انجام شده اند. آزمایشات در دو بخش انجام شده اند. بخش اول، رفتار جریان در مدت زمان شستشو در روزنه بررسی شده است. در بخش دوم میزان فرسایش حاصل از جریان روزنه مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس، یک سازه نیمه محصور در جریان اصلی روزنه قرار گرفت تا کارایی حذف رسوبات افزایش یابد. تاثیر ویژگی های هندسی سازه بر ابعاد حفره شستشو مشخص شد. مشاهده شد که تعامل آب، رسوب و سازه باعث ایجاد گرداب هایی در جریان اصلی روزنه می شود که افزایش حذف رسوب در مخزن را سبب می شود و منجر به شکل گیری یک نیم حفره برای جریان اصلی روزنه می شود.

**کلمات کلیدی:** روزنه ، شستشوی رسوب، ابعاد حفره شستشو، گرداب ، تحقیق آزمایشگاهی

## ۱. مقدمه

روزنه ها سازه های هیدرولیکی هستند که برای اهداف مختلف استفاده می شوند. این سازه ها در سدها برای شستن رسوبات ته نشین شده از مخازن به کار گرفته می شوند. این سازه ها از ساختارهای مهم اندازه گیری جریان هستند. استریتر و همکاران (۲۴)، روزنه ها را به عنوان ورودی عبور جریان تعریف کردند. در مجموع، موقعیت جریان روزنه زمانی شکل می گیرد که ورودی روی مرکز روزنه دارای قطر ۲-۲٫۲ برابر روزنه باشد، در این صورت، این روزنه به عنوان روزنه بزرگ نامیده می شود (گویال و همکاران ۲۰۱۵).

این سازه ها به عنوان مناسب ترین شاخص برای حذف رسوبات جمع شده مخازن استفاده می شوند. حذف رسوبات ته نشین شده در مخزن با افزایش شتاب جریان ، فعالیت شستشو نامیده می شود. در طول مدت شستشو، شتاب های بالا در روزنه موقعیت یابی می شوند و سبب حذف رسوبات از آن می شوند (۱).

تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی قبلی نشان دادند که شستشوی رسوب از طریق روزنه ها کارایی بسیار پایین دارد (۱۷-۶). کارایی شستشو (E) دلالت بر نسبت حجم رسوبات شسته شده ( $V_C$ ) به حجم آب مورد استفاده ( $V_w$ ) در طول مدت شستشو دارد (۲۱) و توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$E = \frac{V_C}{V_w} \quad (1)$$

به عبارت دیگر، یکی از معایب اصلی سازه های روزنه ای، احتمال متوقف شدن توسط رسوبات ته نشین شده است. این مسئله معمولاً در روزنه های سد (خروجی سطح پایین) به دلیل متراکم شدن رسوبات و تاثیرات رفتار هیدرولیک روزنه ها اتفاق می افتد. وقتی که این سازه ها به عنوان خروجی پایین سدها مورد استفاده قرار می گیرند، آماده سازی شرایط افزایش مقاومت جریان روزنه برای حذف رسوبات بیشتر از مخزن (افزایش کارایی شستن) پیشنهاد می شود. در این تحقیق، برای افزایش مقاومت جریان روزنه، یک گروه سد نیمه محصور طراحی و در مسیر جریان قرار گرفت. این سازه ها می توانند روزنه را از مشکل متوقف شدن حفظ کند. پیش بینی شده است که این سازه ها می توانند شرایط جریان پیچیده در جریان اصلی روزنه ها ایجاد کنند. تا جایی که نویسنده می داند، تعامل سازه ها - رسوبات و جریان اصلی روزنه های بزرگ و همچنین اندازه گیری اختلافات زمانی و مکانی بستر رسوبات تاکنون بررسی نشده اند. هدف اولیه این تحقیق، مشاهده رفتار جریان و اختلاف در هندسه بستر رسوب نیمه محصور بر ابعاد حفره بررسی شده است. بنابراین، مخروط شستشو به عنوان حفره شستشو در این تحقیق اشاره شده است.

#### نمادها

$d_{50}$ میانگین اندازه ذرات رسوب m	Re عدد رایموند روزنه ( بدون بعد)
$d_{hole}$ حداکثر عمق مخروط شستشو m	$R_{hole}$ شعاع مخروط شستشو m
$D_{orifice}$ قطر روزنه m	V شتاب جریان خروجی $ms^{-1}$
$D_{pile}$ قطر سد m	Wc حداکثر عرض مخروط شستشو (m)

E کارایی شستشو (بدون بعد)	X,y,z نقاط سیستم مختصات
G افزایش شتاب بر اثر گرانش ( $ms^{-2}$ )	Ps تراکم حجم رسوب ( $kg\ m^{-3}$ )
Gs گرانش ویژه رسوبات (بدون بعد)	P تراکم حجم مایع ( $kg\ m^{-3}$ )
H فشار آب در مرکز روزنه m	$\mu$ ویسکوزیته دینامیک مایع ( $kg\ m^{-1}\ s^{-2}$ )
I فاصله بین دو سد مجاور m	$\sigma_g$ انحراف معیار هندسی رسوب (بدون بعد)
R فاصله هر سد از روزنه m	$V_c$ حجم محروط شستشو ( $m^3$ )
	$V_w$ حجم آب $m^3$

بررسی ادبیات مربوط به روزنه ها دلالت بر این دارد که بسیاری از تحقیقات موجود به بررسی ویژگی جریان خروجی روزنه ها و تاثیر جریان پایین دست روزنه پرداخته اند. چانسون و همکارانش (۳) الگوهای منظم جریان - ظرفیت خروج و شتاب جریان عمودی و افقی بررسی کردند. آنها پی بردند که ضریب خروج جریان در روزنه های عمودی بسیار نزدیک به جریان افقی است. آنها همچنین گزارش دادند که شتاب نامنظم متناسب با محاسبات جریان پتانسیل است و همبستگی خوبی بین اطلاعات تجربی و نظریه جریان ایده آل مشاهده می شود. شاما و همکاران (۲۳)، تاثیرات اندازه و شکل روزنه بر رفتار جریان و شتاب روزنه ریز را بررسی کردند. آنها بیان کردند که در مناطق نزدیکتر، سطح ایزوشتاب نیمه استوانه هستند اما در مناطق دورتر کروی هستند. امامقلی‌زاده و همکاران (۷)، بیان کردند که متغیرهای موثر بر حجم جریان مخروط شستشو در روزنه ها از ویژگی های فیزیکی مایع و رسوب و همچنین آب خروجی می باشند بریانت و همکارانش (۲) یک تحقیق تجربی انجام دادند تا الگوهای جریان اصلی روزنه اصلی - روزنه های متعدد و روزنه نزدیک سطح جریان بررسی کنند. آنها یک راه حل پتانسیل برای جریان پشت روزنه مطرح کردند و گزارش کردند که تناسب خوبی بین نتایج راه حل ارائه شده و داده های اندازه گیری شده وجود دارد. هوساین و همکارانش (۱۰) یک تحقیق تحلیلی و تجربی برای ارزیابی ضریب خروج در روزنه های دایره ای نوک تیز انجام دادند. پاول وفان (۱۹-۲۰) به بررسی انتقال رسوب - میزان رسوب و شکل حفره در روزنه های بدون محدودیت در شرایط وجود جریان ثابت برای اندازه های مختلف رسوب در روزنه پرداختند. آنها متوجه شدند که حداکثر عمق شستشو همراه با فشار روزنه اندازه گیری می شوند و با افزایش اندازه رسوب کاهش می یابد. به علاوه، مولفه های افقی و عمودی شتاب جریان روزنه اندازه گیری شدند. این محققان بیان کردند که حداکثر شتاب در زیر خط اصلی روزنه اتفاق می افتد. آنها از مدل

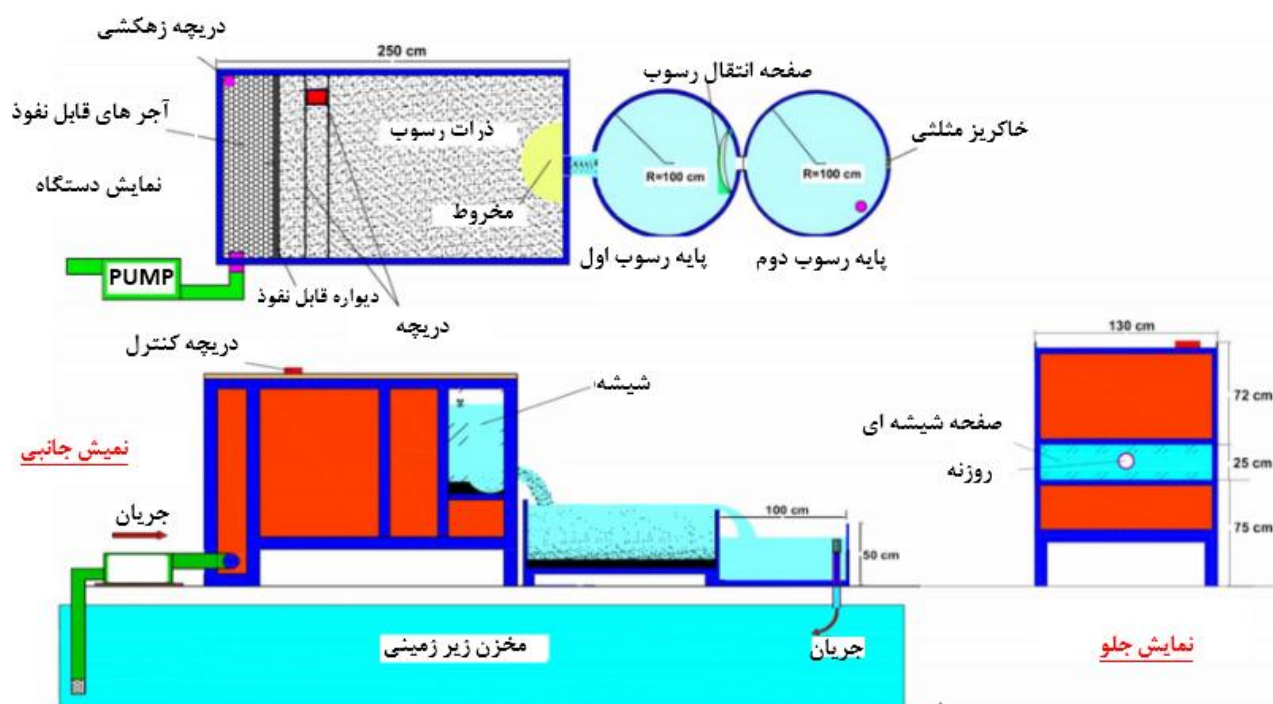
جریان سه بعدی برای شبیه سازی رفتار جریان استفاده کردند و گزارش دادند که این مدل می تواند به دقت شتاب را پیش بینی کند. سان و لیو (۲۵)، ویژگی های گرداب های نزدیک روزنه ها- دریچه ها و سازه های ورودی را بررسی کردند. بر اساس اطلاعات تجربی گردآوری شده و تحلیل تئوری، یک مدل ریاضی برای توصیف ویژگی های هیدرولیک اصلی گرداب مطرح شد. نتایج به دست آمده برای مدل مطرح شده با اطلاعات تجربی و سایر مدل های گرداب مقایسه شدند و تناسب خوبی برای آنها یافت شد.

نقش گرداب ها در پدیده شستشو نیز توسط رادکیوی (۳۲) و ملویل (۱۳) بررسی شده است. رادکیوی (۲۲) ادعا کردند که گرداب ها دارای محورهای عمودی در جهت جریان در مرکز هستند. ملویل (۱۳) گزارش کرد که وقتی جریان از سطح سازه می گذرد، فشار ثابت ایجاد می شود که سبب شکل گیری جریان در قسمت جلوی سد می شود. جریان پایین دست با حرکت چرخشی به سمت پایین شتاب می گیرد و رسوبات یستر را هل می دهد و باعث شکل گیری گرداب های نعل شکل می شود. همزمان، تفکیک جریان در طرفین هر سد باعث ایجاد گرداب نعل شکل می شود. ملوی و هادفیلد (۱۵) گزارش کردند که شستشوی رسوب در جریان پایین دست سدها اتفاق می افتد که دلیل آن وجود جریان . منطقه گرداب می باشد. سایر فاکتورهای مهم در شستشو مربوط به زمان است (۱۴-۱۲). از این طریق، اختلافات زمانی در مخروط باید در طراحی و فعالیت سدها در نظر گرفته شود. این عامل بستگی به شرایط جریان، هندسه سازه و ویژگی های رسوب دارد.

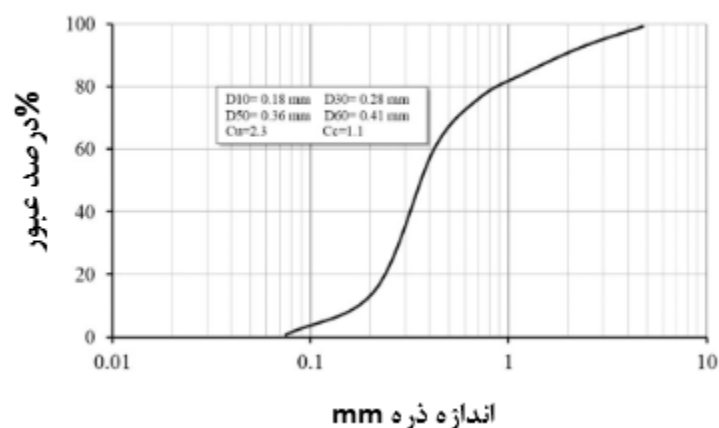
## ۲. روش ها و مواد

آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان و بر روی یک مخزن مستطیل شکل دارای روزنه گرد بزرگ با قطر ۹,۵ انجام شد. با در نظر گرفتن فضای آزمایشگاه و ظرفیت پمپ، اندازه مخزن به گونه ای انتخاب می شود که به راحتی بتوان فرایند شستشوی رسوب را مشاهده کرد. عرض مخزن به اندازه ای است که دیواره های جانبی مخزن تاثیری بر پدیده شستشو ایجاد نمی کنند. طول مخزن نیز به اندازه ای انتخاب می شود که از وجود جریان آرام اطمینان حاصل شود. از اینرو، طول - عرض و ارتفاع مخزن به ترتیب ۲,۵ - ۱,۳ و ۱,۵ متر است. یک بخش در سمت راست و دیواره های جلوی مخزن از شیشه ساخته شده اند تا بتوان جریان را در نزدیکی

دهانه در هنگام شستشو مشاهده کرد. (شکل ۱) نشان دهنده چشم اندازی از مدل است. جریان از یک پمپ زیرزمینی و از طریق سانترفیوژ قرار گرفته در مجاورت مخزن تامین می شود. دو دریچه پروانه ای در سیستم چرخش مخزن قرار گرفته اند که یکی از آنها جریان ورودی را تنظیم می کند و دیگری جریان خروجی را که یکی از آنها جریان ورودی را تنظیم می کند و دیگری جریان خروجی را تنظیم می کند. چندین اندازه گیری برای آجرها و صفحات عمودی در بخش ورودی مخزن انجام می شود تا از شکل گیری نوسانات بزرگ ممانعت شود و نوسانات حاصل از پمپ کاهش یابند. رسوبات غیر پیوسته با  $d_{50}=0.36 \text{ mm}$  و  $\sigma_g = 2.24$  در این تحقیق استفاده شدند. شکل (۲) نشان دهنده منحنی توزیع ذرات برای رسوبات بستر است. قبل از شروع هر مرحله از آزمایش ضخامت رسوب در مخزن ۴۰ سانتیمتر بود. استوانه ای PVC با قطرهای مختلف ( $D_{pile}$ ) و فضاها (۱) با توجه به جدول ۱، در مخزن در فاصله های مختلف ( $R$ ) استفاده می شوند (شکل ۳). ابعاد هندسی مخروط شستشو با استفاده از دریچه کنترل قرار گرفته روی مخزن اندازه گیری می شوند. تکنیک تزریق  $D_{1/e}$  همراه با دوربین ISIVOSX برای نشان دادن ویژگی های شستشو در طول آزمایش با گرفتن عکس و ضبط فیلم به کار گرفته می شود.



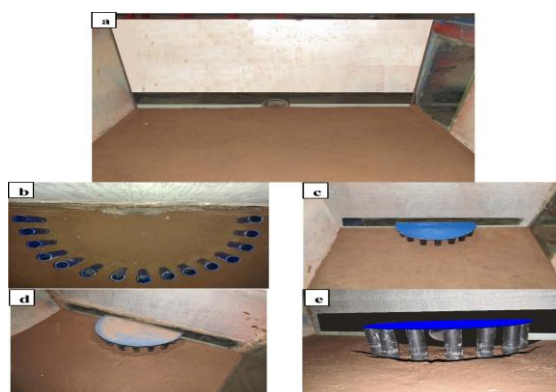
شکل ۱. نمایش تصویری سیستم تامین آب و مخزن مدل



شکل ۲. نمودار توزیع اندازه ذرات در رسوبات بستر

## ۲.۱ روش آزمایش

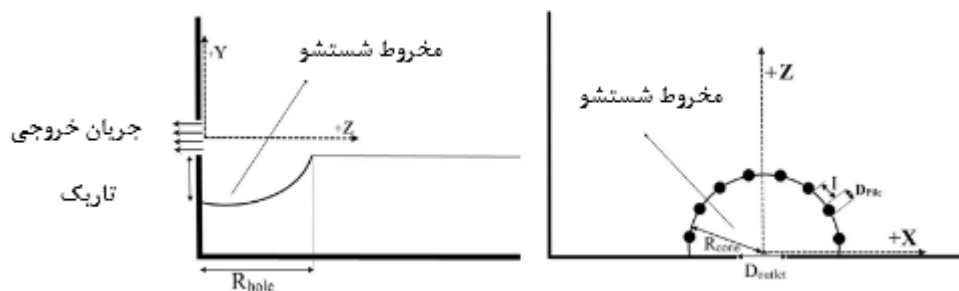
هدف این تحقیق، بررسی مکانیزم شستشوی رسوب جریان اصلی در روزنه گر در بزرگ در طول مدت شستشو است. برای افزایش قدرت جریان روزنه، یک ساختار جدید که در شکل ۲ نشان داده شده است (دارای سد استوانه ای نیمه محصور فرورفته در آب است که در اطراف روزنه قرار می گیرد). شکل ۴ نشان دهنده چشم انداز جانبی و نقشه طرح آن است. دلیل انتخاب طرح نیم دایره مربوط به نتایج انجام آزمایشات مرجع است که در آنها شکل نهایی مخروط نیم دایره است. در این تحقیق، آزمایش مرجع مربوط به عدم استفاده از سد در اطراف روزنه است. در مجموع، ۲۰۳ آزمایش برای اندازه گیری ابعاد مخروط شستشو انجام شد. تمام آزمایشات در شرایط وجود فشار ثابت آب  $H=45\text{CM}$  از مرکز روزنه تا سطح در مخزن انجام شدند، اما دو جریان خروجی مختلف (10L/S-14,5L/S) استفاده شده است.



شکل ۳. آماده سازی جریان بالا دست بستر رسوب روزنه a - روش ادغام سازه مطرح شده در مخزن ، قبل (b,c) و

بعد (d,e)

روش انجام آزمایشات به گونه ای است که در ابتدا پمپ شروع به کار می کند و جریان وارد مخزن می شود. سپس، روزنه باز می شود تا جریان ورودی معادل جریان خروجی شود.



شکل ۴. نمایش تصویری روزنه و حفره شستشو « منظره جانبی (چپ) و چشم انداز بالا ( راست)

## ۲.۲ تحلیل ابعادی

با در نظر گرفتن متغیرهای موثر بر فرآیند موثر گزارش شده توسط امامقلی‌زاده و همکارانش (۷) و ویژگی های هنرسی سازه مطرح شده در تحقیق حاضر، نتیجه گیری شده است که متغیرهای اصلی که بر حجم مخروط شستشو ( $V_C$ ) تاثیر می گذارند شامل تراکم مایع ( $P$ ) - ویسکوزیته مایع ( $M$ ) - میانگین اندازه ( $d_{50}$ ) - تراکم رسوب ( $p_s$ ) - فشار نهایی روی مرکز روزنه ( $H$ ) - گرانش جریان خروجی روزنه ( $g$ ) - پارامتر سد ( $D_{pile}$ ) - فاصله بین دو سد مجاور ( $I$ ) - فاصله هر سد از روزنه ( $R$ ) می شوند. معادله ۲ نشان دهنده این مفاهیم به شکل کاربردی هستند

$$f(V_C, \rho, \mu, d_{50}, \rho_s, H, Q, D_{orifice}, g, D_{pile}, I, R) = 0 \quad (2)$$

با انتخاب  $H, g, p$  به عنوان متغیرهای تکراری، واژگان و اصطلاحات اصلی تحلیلی ابعادی بصورت زیر داده می شوند:

$$f\left(\frac{V_C}{D_{orifice}^3}, \frac{d_{50}}{D_{orifice}}, \frac{H}{D_{orifice}}, \frac{Q}{\sqrt{gD_{orifice}^5}}, \frac{D_{pile}}{D_{orifice}}, \frac{I}{D_{orifice}}, \frac{R}{D_{orifice}}, Gs, Re\right) = 0 \quad (3)$$

بطوری که  $Re = \frac{\rho V D_{orifice}}{\mu}$  تعداد روزنه های رینولد است و  $G_s = \frac{\rho_s}{\rho}$  گرانش خاص رسوب است. برای انجام این تحقیق ، بعضی از اصطلاحات رابطه ۳ ممکن است حذف شوند. در تمام آزمایشات، رسوبات مورد استفاده شامل شن با گرانش خاص هستند و گرانش نسبی ( $G_s$ ) می تواند نادیده گرفته شود. به علاوه، تاثیر  $Re$  در شرایط وجود جریان نوسانی کم در نظر گرفته می شود. چون مقدار  $D_{orifice}$  و  $H$  و  $d_{50}$  در تمام آزمایشات ثابت است، مقدار

و  $\frac{d_{50}}{D_{orifice}}$ ؛  $\frac{H}{D_{orifice}}$  نیز ثابت می ماند. با در نظر گرفتن این توضیحات، معادله ۳ به شکل زیر ساده می شود:

$$\frac{V_c}{D_{orifice}^3} = f_1 \left( \frac{Q}{\sqrt{g D_{orifice}^5}}, \frac{D_{pile}}{D_{orifice}}, \frac{I}{D_{orifice}}, \frac{R}{D_{orifice}} \right) \quad (4)$$

با توجه به رابطه ۳، قطر سدها و فاصله آنها از هم و همچنین فاصله از روزنه، سه پارامتر موثر در حجم مخروط شستشو هستند. همان طور که گفته شد، یکی از اهداف این تحقیق بررسی تاثیر  $I$ ،  $D_{orifice}$  و  $R$  بر حجم مخروط شستشو بود.

ویژگی های هندسی بررسی شده مخروط عبارتند از: ۱- حداکثر عمق شستشو ۲- حداکثر شعاع مخروط شستشو و

۳- مقدار رسوبات ارزشابی شده در فعالیت شستشو

جدول ۱. آزمایشات انجام شده در تحقیق کنونی

مدل	D (m)	I (m)	R (m)	Q (L/s)	H (m)	مدل	D (m)	I (m)	R (m)	Q (L/s)	H (m)
1 مرجع	—	—	—	14.5	0.45	D3 I3 R4	0.032	0.048	0.050	10	0.45
2 مرجع	—	—	—	10	0.45	D3 I4 R1	0.032	0.064	0.020	10	0.45
D1 I1 R1a	0.020	0.016	0.020	14.5	0.45	D3 I3 R1	0.032	0.048	0.020	14.5	0.45
D1 I1 R2	0.020	0.016	0.030	14.5	0.45	D3 I3 R2	0.032	0.048	0.030	14.5	0.45
D1 I1 R3	0.020	0.016	0.040	14.5	0.45	D3 I3 R3	0.032	0.048	0.040	14.5	0.45
D1 I1 R4	0.020	0.016	0.050	14.5	0.45	D3 I3 R4	0.032	0.048	0.050	14.5	0.45
D1 I2 R1	0.020	0.032	0.020	14.5	0.45	D3 I4 R1	0.032	0.064	0.020	14.5	0.45
D1 I2 R2	0.020	0.032	0.030	14.5	0.45	D3 I4 R2	0.032	0.064	0.030	14.5	0.45
D1 I2 R3	0.020	0.032	0.040	14.5	0.45	D3 I4 R3	0.032	0.064	0.040	14.5	0.45
D1 I2 R4	0.020	0.032	0.050	14.5	0.45	D3 I4 R4	0.032	0.064	0.050	14.5	0.45
D1 I3 R1	0.020	0.048	0.020	14.5	0.45	D3 I5 R1	0.032	0.096	0.020	14.5	0.45
D1 I3 R2	0.020	0.048	0.030	14.5	0.45	D3 I5 R2	0.032	0.096	0.030	14.5	0.45
D1 I3 R3	0.020	0.048	0.040	14.5	0.45	D3 I5 R3	0.032	0.096	0.040	14.5	0.45
D1 I3 R4	0.020	0.048	0.050	14.5	0.45	D3 I5 R4	0.032	0.096	0.050	14.5	0.45
D1 I4 R1	0.020	0.064	0.020	14.5	0.45	D4 I1 R1	0.040	0.016	0.020	14.5	0.45
D1 I4 R2	0.020	0.064	0.030	14.5	0.45	D4 I1 R2	0.040	0.016	0.030	14.5	0.45
D1 I4 R3	0.020	0.064	0.040	14.5	0.45	D4 I1 R3	0.040	0.016	0.040	14.5	0.45
D1 I4 R4	0.020	0.064	0.050	14.5	0.45	D4 I1 R4	0.040	0.016	0.050	14.5	0.45
D1 I5 R1	0.020	0.096	0.020	14.5	0.45	D4 I2 R1	0.040	0.032	0.020	14.5	0.45
D1 I5 R2	0.020	0.096	0.030	14.5	0.45	D4 I2 R2	0.040	0.032	0.030	14.5	0.45
D1 I5 R3	0.020	0.096	0.040	14.5	0.45	D4 I2 R3	0.040	0.032	0.040	14.5	0.45
D1 I5 R4	0.020	0.096	0.050	14.5	0.45	D4 I2 R4	0.040	0.032	0.050	14.5	0.45
D2 I1 R1	0.025	0.016	0.020	14.5	0.45	D4 I3 R1	0.040	0.048	0.020	14.5	0.45



D2 I1 R2	0.025	0.016	0.030	14.5	0.45	D4 I3 R2	0.040	0.048	0.030	14.5	0.45
D2 I1 R3	0.025	0.016	0.040	14.5	0.45	D4 I3 R3	0.040	0.048	0.040	14.5	0.45
D2 I1 R4	0.025	0.016	0.050	14.5	0.45	D4 I3 R4	0.040	0.048	0.050	14.5	0.45
D2 I2 R1	0.025	0.032	0.020	14.5	0.45	D4 I4 R1	0.040	0.064	0.020	14.5	0.45
D2 I2 R2	0.025	0.032	0.030	14.5	0.45	D4 I4 R2	0.040	0.064	0.030	14.5	0.45
D2 I2 R3	0.025	0.032	0.040	14.5	0.45	D4 I4 R3	0.040	0.064	0.040	14.5	0.45
D2 I2 R4	0.025	0.032	0.050	14.5	0.45	D4 I4 R4	0.040	0.064	0.050	14.5	0.45
D2 I3 R1	0.025	0.048	0.020	14.5	0.45	D4 I5 R1	0.040	0.096	0.020	14.5	0.45
D2 I3 R2	0.025	0.048	0.030	14.5	0.45	D4 I5 R2	0.040	0.096	0.030	14.5	0.45
D2 I3 R3	0.025	0.048	0.040	14.5	0.45	D4 I5 R3	0.040	0.096	0.040	14.5	0.45
D2 I3 R4	0.025	0.048	0.050	14.5	0.45	D4 I5 R4	0.040	0.096	0.050	14.5	0.45
D2 I4 R1	0.025	0.064	0.020	14.5	0.45	D5 I1 R1	0.050	0.016	0.020	14.5	0.45
D2 I4 R2	0.025	0.064	0.030	14.5	0.45	D5 I1 R2	0.050	0.016	0.030	14.5	0.45
D2 I4 R3	0.025	0.064	0.040	14.5	0.45	D5 I1 R3	0.050	0.016	0.040	14.5	0.45
D2 I4 R4	0.025	0.064	0.050	14.5	0.45	D5 I1 R4	0.050	0.016	0.050	14.5	0.45
D2 I5 R1	0.025	0.096	0.020	14.5	0.45	D5 I2 R1	0.050	0.032	0.020	14.5	0.45
D2 I5 R2	0.025	0.096	0.030	14.5	0.45	D5 I2 R2	0.050	0.032	0.030	14.5	0.45
D2 I5 R3	0.025	0.096	0.040	14.5	0.45	D5 I2 R3	0.050	0.032	0.040	14.5	0.45
D2 I5 R4	0.025	0.096	0.050	14.5	0.45	D5 I2 R4	0.050	0.032	0.050	14.5	0.45
D3 I1 R1	0.032	0.016	0.020	14.5	0.45	D5 I3 R1	0.050	0.048	0.020	14.5	0.45
D3 I1 R2	0.032	0.016	0.030	14.5	0.45	D5 I3 R2	0.050	0.048	0.030	14.5	0.45
D3 I1 R3	0.032	0.016	0.040	14.5	0.45	D5 I3 R3	0.050	0.048	0.040	14.5	0.45
D3 I1 R4	0.032	0.016	0.050	14.5	0.45	D5 I3 R4	0.050	0.048	0.050	14.5	0.45
D3 I2 R1	0.032	0.032	0.020	14.5	0.45	D5 I4 R1	0.050	0.064	0.020	14.5	0.45
D3 I2 R2	0.032	0.032	0.030	14.5	0.45	D5 I4 R2	0.050	0.064	0.030	14.5	0.45
D3 I2 R3	0.032	0.032	0.040	14.5	0.45	D5 I4 R3	0.050	0.064	0.040	14.5	0.45
D3 I2 R4	0.032	0.032	0.050	14.5	0.45	D5 I4 R4	0.050	0.064	0.050	14.5	0.45
D5 I5 R4	0.050	0.096	0.050	14.5	0.45	D5 I5 R1	0.050	0.096	0.020	14.5	0.45
D1 I1 R2	0.020	0.016	0.030	10	0.45	D5 I5 R2	0.050	0.096	0.030	14.5	0.45
D1 I1 R3	0.020	0.016	0.040	10	0.45	D5 I5 R3	0.050	0.096	0.040	14.5	0.45
D1 I1 R4	0.020	0.016	0.050	10	0.45	D3 I4 R2	0.032	0.064	0.030	10	0.45
D1 I2 R1	0.020	0.032	0.020	10	0.45	D3 I4 R3	0.032	0.064	0.040	10	0.45
D1 I2 R2	0.020	0.032	0.030	10	0.45	D3 I4 R4	0.032	0.064	0.050	10	0.45
D1 I2 R3	0.020	0.032	0.040	10	0.45	D3 I5 R1	0.032	0.096	0.020	10	0.45
D1 I2 R4	0.020	0.032	0.050	10	0.45	D3 I5 R2	0.032	0.096	0.030	10	0.45
D1 I3 R1	0.020	0.048	0.020	10	0.45	D3 I5 R3	0.032	0.096	0.040	10	0.45
D1 I3 R2	0.020	0.048	0.030	10	0.45	D3 I5 R4	0.032	0.096	0.050	10	0.45
D1 I3 R3	0.020	0.048	0.040	10	0.45	D4 I1 R1	0.040	0.016	0.020	10	0.45
D1 I3 R4	0.020	0.048	0.050	10	0.45	D4 I1 R2	0.040	0.016	0.030	10	0.45
D1 I4 R1	0.020	0.064	0.020	10	0.45	D4 I1 R3	0.040	0.016	0.040	10	0.45
D1 I4 R2	0.020	0.064	0.030	10	0.45	D4 I1 R4	0.040	0.016	0.050	10	0.45
D1 I4 R3	0.020	0.064	0.040	10	0.45	D4 I2 R1	0.040	0.032	0.020	10	0.45
D1 I4 R4	0.020	0.064	0.050	10	0.45	D4 I2 R2	0.040	0.032	0.030	10	0.45
D1 I5 R1	0.020	0.096	0.020	10	0.45	D4 I2 R3	0.040	0.032	0.040	10	0.45
D1 I5 R2	0.020	0.096	0.030	10	0.45	D4 I2 R4	0.040	0.032	0.050	10	0.45
D1 I5 R3	0.020	0.096	0.040	10	0.45	D4 I3 R1	0.040	0.048	0.020	10	0.45
D1 I5 R4	0.020	0.096	0.050	10	0.45	D4 I3 R2	0.040	0.048	0.030	10	0.45
D2 I1 R1	0.025	0.016	0.020	10	0.45	D4 I3 R3	0.040	0.048	0.040	10	0.45

D2 I1 R2	0.025	0.016	0.030	10	0.45	D4 I3 R4	0.040	0.048	0.050	10	0.45
D2 I1 R3	0.025	0.016	0.040	10	0.45	D4 I4 R1	0.040	0.064	0.020	10	0.45
D2 I1 R4	0.025	0.016	0.050	10	0.45	D4 I4 R2	0.040	0.064	0.030	10	0.45
مدل	D (m)	I (m)	R (m)	Q (L/s)	H (m)	مدل	D (m)	I (m)	R (m)	Q (L/s)	H (m)
D2 I2 R1	0.025	0.032	0.020	10	0.45	D4 I4 R3	0.040	0.064	0.040	10	0.45
D2 I2 R2	0.025	0.032	0.030	10	0.45	D4 I4 R4	0.040	0.064	0.050	10	0.45
D2 I2 R3	0.025	0.032	0.040	10	0.45	D4 I5 R1	0.040	0.096	0.020	10	0.45
D2 I2 R4	0.025	0.032	0.050	10	0.45	D4 I5 R2	0.040	0.096	0.030	10	0.45
D2 I3 R1	0.025	0.048	0.020	10	0.45	D4 I5 R3	0.040	0.096	0.040	10	0.45
D2 I3 R2	0.025	0.048	0.030	10	0.45	D4 I5 R4	0.040	0.096	0.050	10	0.45
D2 I3 R3	0.025	0.048	0.040	10	0.45	D5 I1 R1	0.050	0.016	0.020	10	0.45
D2 I3 R4	0.025	0.048	0.050	10	0.45	D5 I1 R2	0.050	0.016	0.030	10	0.45
D2 I4 R1	0.025	0.064	0.020	10	0.45	D5 I1 R3	0.050	0.016	0.040	10	0.45
D2 I4 R2	0.025	0.064	0.030	10	0.45	D5 I1 R4	0.050	0.016	0.050	10	0.45
D2 I4 R3	0.025	0.064	0.040	10	0.45	D5 I2 R1	0.050	0.032	0.020	10	0.45
D2 I4 R4	0.025	0.064	0.050	10	0.45	D5 I2 R2	0.050	0.032	0.030	10	0.45
D2 I5 R1	0.025	0.096	0.020	10	0.45	D5 I2 R3	0.050	0.032	0.040	10	0.45
D2 I5 R2	0.025	0.096	0.030	10	0.45	D5 I2 R4	0.050	0.032	0.050	10	0.45
D2 I5 R3	0.025	0.096	0.040	10	0.45	D5 I3 R1	0.050	0.048	0.020	10	0.45
D2 I5 R4	0.025	0.096	0.050	10	0.45	D5 I3 R2	0.050	0.048	0.030	10	0.45
D3 I1 R1	0.032	0.016	0.020	10	0.45	D5 I3 R3	0.050	0.048	0.040	10	0.45
D3 I1 R2	0.032	0.016	0.030	10	0.45	D5 I3 R4	0.050	0.048	0.050	10	0.45
D3 I1 R3	0.032	0.016	0.040	10	0.45	D5 I4 R1	0.050	0.064	0.020	10	0.45

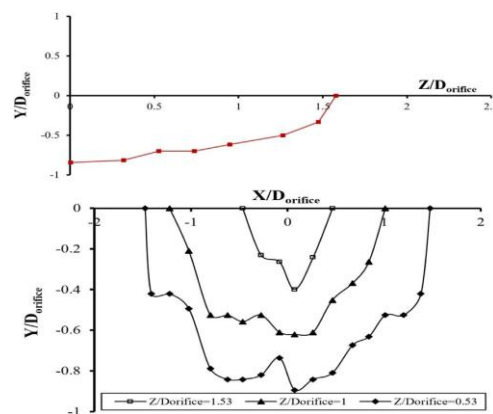
D3 I1 R4	0.032	0.016	0.050	10	0.45	D5 I4 R2	0.050	0.064	0.030	10	0.45
D3 I2 R1	0.032	0.032	0.020	10	0.45	D5 I4 R3	0.050	0.064	0.040	10	0.45
D3 I2 R2	0.032	0.032	0.030	10	0.45	D5 I4 R4	0.050	0.064	0.050	10	0.45
D3 I2 R3	0.032	0.032	0.040	10	0.45	D5 I5 R1	0.050	0.096	0.020	10	0.45
D3 I2 R4	0.032	0.032	0.050	10	0.45	D5 I5 R2	0.050	0.096	0.030	10	0.45
D3 I3 R1	0.032	0.048	0.020	10	0.45	D5 I5 R3	0.050	0.096	0.040	10	0.45
D3 I3 R2	0.032	0.048	0.030	10	0.45	D5 I5 R4	0.050	0.096	0.050	10	0.45
D3 I3 R3	0.032	0.048	0.040	10	0.45						

### ۳. نتایج تجربی

اولین مجموعه از آزمایشات بدون قرار دادن جریان بالا دستی در مخروط انجام شده اند. مکانیزم اولیه انتقال رسوب در ثانیه های اولیه این مجموعه از آزمایشات مربوط به افزایش فشار کشش جریان است که از افزایش آب خروجی روزنه حاصل می شود و بعد از شستن رسوب، یک جریان شستشو در مخروط ایجاد می کند. بعد از حدود ۳ دقیقه، به دلیل افزایش عمق مخروط شستشو، گرداب دارای چرخش مخالف در زیر روزنه شکل می گیرد ( شکل ۵ ). این گرداب باعث افزایش رسوبات حاصل از شستشو به داخلی آب خروجی می شود و سپس مکانیزم حذف رسوبات از مخروط شستشو شکل می دهند. سپس، گردابها با هم ترکیب می شوند و گرداب قویتری ایجاد می کنند. ذرات رسوب به طرفین می روند و در گرداب مرکزی تغذیه می شوند و بصورت عمودی در خارج از مخروط مکیده می شوند. در انتهای هر آزمایش، یک سری برآمدگی و فرورفتگی در داخل مخروط شکل می گیرند (۱۸).



شکل ۵. الگوی جریان بالا دست روزنه



شکل ۶. پروفایل طولی (بالا) و برش مقطعی (راست) برای مخروط شستشو

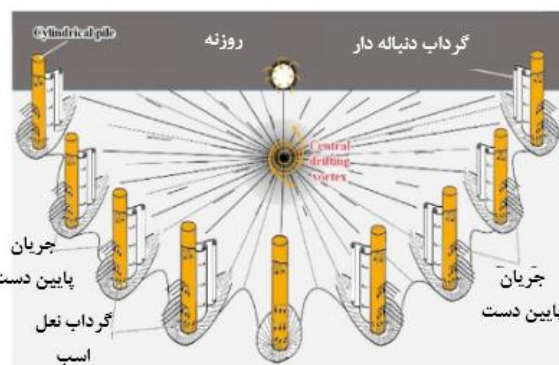
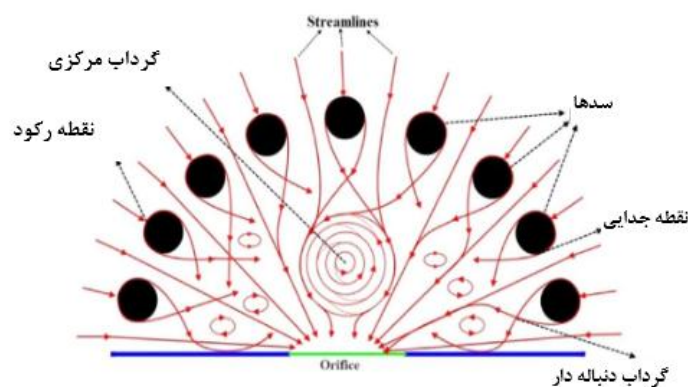
مشاهدات بیانگر این است که مقدار رسوبات شسته شده بستگی به مقاومت گرداب دارند. بنابراین، با افزایش مقاومت گردابها، امکان حذف رسوب بیشتر از مخزن وجود دارد. همچنین، در این تحقیق تجربی، یک سازه متشکل از چند سد محدود به روزنه متصل شدند تا مقاومت گرداب و نوسان جریان افزایش یابد. به علاوه، با استفاده از سازه مطرح شده در سدها، خطر متوقف شدن به دلیل وجود رسوبات کاهش می یابد.

یکی از ویژگی های اصلی حفره شستشو در جریان اصلی روزنه مربوط به شکل نهایی حفره شستشو است. اطلاعات مربوط به برش مقطعی می تواند برای محاسبات آینده و ارائه مدل عددی مورد استفاده قرار بگیرد. شکل (۶) نشان دهنده برش مقطعی مخروط شستشو در ۳ فاصله مختلف  $Z/D_{orifice}=0.53$ ,  $Z/D_{orifice}=1$  و  $Z/D_{orifice}=1.53$  از روزنه است. با توجه به شکل، ابعاد مخروط شستشو با افزایش فاصله از روزنه افزایش می یابد. به عبارت دیگر، محیط مقطعی در فاصله  $Z/D_{orifice}=0.53$  برابر مقطع  $Z/D_{orifice}=1.53$  است.

همچنین، آزمایشات نشان داد که شیب جانبی مخروط شستشو زاویه جمع شدن رسوب ۲۶ درجه است. این مطلب شبیه به مشاهدات امامقلیزاده و فتحی مقدم (۶) است. در این راستا، فنگ و کائو (۹) گزارش کردند که برای رسوبات دانه ای، شیب مخروط می تواند با ترکیب زاویه حالت بدون نوسان محاسبه شود.

### ۳.۱ تاثیر سازه مطرح شده بر فرایند شستشو

مکانیزم فعالیت شستشو در شرایط وجود سازه مطرح شده تحت تاثیر دو فاکتور قرار می گیرد ۱. وارد شدن جریان به داخل سد (شستشوی منطقه ای) ۲. محدودسازی جریان با استفاده از صفحات محدود کننده و سدهای عمودی در طول هر آزمایش انجام شده در این تحقیق، تعامل قوی بین اندازه سد، فاصله بین دو سد مجاور و اندازه مخروط شیتشو و مقاومت جریان پایین دست و همچنین گرداب های نعل اسبی مشاهده شده است (شکل ۷). گرداب های دنباله دار با گرداب های نعل اسبی تعامل برقرار می کنند و این عامل باعث افزایش مقاومت و ایجاد نوسان جانبی و عمودی می شود. به علاوه، گرداب های دنباله دار باعث ایجاد فرایند فرسایش می شوند که به دنبال آن حذف رسوب اتفاق می افتد. تزریق جریان نشان داد که در حوزه های میدانی، و با نزدیک شدن به سدها جریان ها اختلاف سه بعدی پیدا می کنند و مناطق پیچیده. جریان های ثانویه شناسایی می شوند. در این مورد، جریان باید از شکاف بین سدها عبور کند که این عامل منجر به ایجاد جریان قابل توجه با شتاب بالاتر، نوسان و نیروهای گردابی می شود که از بستر مواد دور می شوند و مخروط شستشو را با سرعت بیشتری در مقایسه با آزمایش مرجع تشکیل می دهند. با این فرایند، مخروط شستشو با توجه به شتاب زیاد در تقاطع جریان های گرداب دنباله دار تشکیل می شود. در تمام موارد آزمایش شده در این تحقیق، مشاهده شد که حداکثر عمق شستشو در مرکز مخروط شستشو و به دلیل تاثیر گرداب مرکزی و گرداب دنباله دار اتفاق می افتد (شکل ۷).



شکل ۷. آماده سازی رسوبات جریان بالا دست بستر (a) روش ادغام سازه مطرح شده در مخزن قبل (b,c) و بعد از آزمایش (d,e)

### ۳.۲ تاثیر قطر سد

در ساختار مطرح شده، سد های مدور دارای قطرهای مختلف 0.21 ( $D_1=0.020$  m), 0.26 ( $D_2=0.025$  m), 0.35 ( $D_3=0.032$  m), 0.42 ( $D_4=0.040$  m), 0.53 ( $D_5=0.050$  m) و 0.58 ( $D_6=0.060$  m) مورد استفاده قرار گرفتند. در این بخش، نتایج آزمایش های  $D_1 l_2 R_2$ ,  $D_2 l_2 R_2$ ,  $D_3 l_2 R_2$ ,  $D_4 l_2 R_2$  و  $D_5 l_2 R_2$  مورد بحث قرار گرفته اند. ( $l_2=0.032$  m,  $R_2=0.300$  m). نتایج داده شده برای تمام ترکیبات  $R$  و  $l_2$  صدق می کنند. برای سایر موقعیت ها، تاثیر قطر ستون بر ابعاد مخروط شستشو تشریح شده اند (شکل 8a,b). با استفاده از سدها، عمق نسبی مخروط های

شستشو کاهش می یابد، بنابراین، سرعت جریان خروجی برای ۱۴,۵ لیتر/ثانیه، مقدار  $d_{hole}/D_{orifice}$  از ۰,۸۳ تا ۰,۹۵ برای آزمایش  $D_{pile}/l = 1$  افزایش می یابد. با افزایش قطر سد، عمق مخروط شستشو کاهش می یابد و حداقل عمق برای مخروط در  $D_{pile}/l = 1.516$  برابر  $d_{hole}/D_{orifice} = 0.68$  مشاهده می شود (شکل 8a). به عبارت دیگر، از میان قطرهای داده شده برای سدها،  $D_{pile}/l = 1$  بیشترین کارایی حذف رسوب را دارد. در سدهای نازک تر، ( $D_{pile}/l < 1$ ) دارای گرداب های کافی برای حذف و جابجا کردن رسوبات وجود ندارد، بنابراین شستشوی کم در جریان اصلی روزنه مشاهده می شود. در ستون های دارای قطر بیشتر ( $D_{pile}/l > 1$ )، گرداب نعل اسبی شکل نمی گیرد و فشار کششی تنها عامل شکل گیری مخروط شستشو می باشد. این مطلب متناسب با مشاهدات تحقیق کاریتن و شارمن (۴) است. در حقیقت، سدهای بزرگتر به عنوان یک مانع عمل می کنند و شتاب جریان و نوسان حاصل از تاثیرات خارجی بر مقاومت گرداب مرکزی را کاهش می دهند. بنابراین، برای  $D_{pile}/l > 1$ ، حداکثر عمق مخروط کاهش می یابد. به علاوه، در سدهای دارای قطر بزرگتر، گرداب های حاصل از سد فرصت کافی برای وجود جریان قوی ایجاد نمی کنند زیرا فاصله بین سدها و روزنه کم است. به عبارت دیگر، قبل از تقویت گرداب ها، جریان به روزنه می رسد. به عبارت دیگر، جریان خروجی 14.5 لیتر/ثانیه و شعاع نسبی مخروط شستشو  $(R_{hole}/l)$  از ۱,۵۸ در آزمایش مرجع به ۳,۶ در آزمایش  $D_{pile}/l = 1.516$  می رسد که دلالت بر افزایش ۱۲۸٪ در شعاع نسبی مخروط شستشو دارد (شکل 8b). با افزایش قطر سد، منطقه شستشو در مقایسه با آزمایش مرجع افزایش می یابد. روند مشابهی برای جریان خروجی 10L/S مشاهده می شود.

### ۳,۳ تاثیر فضای بین سدها

برای سدهایی که بیشترین تاثیر شستشو وجود دارد ( $D_{pile}/l = 1$ )، فاصله بین سدها ( $l$ ) برای بررسی تاثیر  $l$  بر ابعاد مخروط شستشو تغییر می کنند. برای این منظور، سدها در ۵ فاصله مختلف از یکدیگر قرار می گیرند. نتایج آزمایشات  $D_{3l1}R_2, D_{3l2}R_2, D_{3l3}R_2, D_{3l4}R_2, D_{3l5}R_2$   $1.01.l/D_{orifice} = 0.17, 0.34, 0.51, 0.67$  اینجا مورد بحث قرار گرفته است. برای تمام موقعیت ها، نتایج منسجم هستند. شکل 9a,b نشان دهنده تاثیر بر ویژگی های مخروط شستشو هستند. با افزایش فضای سدها، حداکثر عمق مخروط شستشو ابتدا افزایش می یابد و

سپس کم می شود. در موقعیت آزمایش مرجع، مقدار  $d_{hole}/D_{orifice}$  برای خروجی جریان 14.5 l/s برابر ۰.۸۳ خواهد بود، در حالی که برای  $I/D_{orifice} = 0.17$  مقدار عمق به ۱.۳ می رسد که دلالت بر این دارد که افزایش ۵۶ درصدی در عمق شستشو اتفاق افتاده است. با افزایش فضای سد ها، عمق مخروط شستشو به ۰.۷ می رسد در حالی که این مقدار کمتر از عمق مخروط در آزمایش کمتر است. در مواردی که  $I/D_{orifice} > 0.17$ ، عمق مخروط شستشو در بین سد ها و حداکثر عمق کاهش می یابد زیرا تاثیر شتاب جریان ضعیف می شود و فشار کششی در مخروط شستشو کاهش می یابد. در حقیقت، با افزایش فاصله، تداخل جریان از هر سد ضعیف می شود و مقاومت گرداب کاهش می یابد. به علاوه، تخریب در بین جریان و گرداب مرکزی و نوسان کاهش می یابد. این مطلب همراه با نتایج تحقیق الیوت و بیکر (۵) و کیم و همکاران (۱۱) است که گزارش دادند اگر فضای سد زیاد شود، تداخل جریان افزایش می یابد و این عامل منجر به جریان شستشوی بیشتر در مخروط می شود. برای  $I/D_{orifice} = 0.17$ ، نه تنها ظرفیت فرسایش جریان بیشتر می شود، بلکه به دلیل وجود واکنش بین جریان و سد ها، نوسان جریان افزایش می یابد که منجر به جریان شستشوی بیشتر می شود. به علاوه، گرداب نعل شکل متراکم می شود و  $I/D_{orifice} = 0.17$  بین خط جریان با هر کدام از گرداب ها افزایش می یابد.

با توجه به شکل 9b می توان مشاهده کرد که تاثیر سد ها به نسبت فضای حاصل از شعاع مخروط شستشو تقریباً ثابت است. در این موقعیت، حداکثر شعاع مخروط شستشو در  $I/D_{orifice} = 0.17$  مشاهده می شود که برابر ۳.۳۷ برای جریان خروجی 14.5L/S است و دلالت بر این دارد که افزایش ۱۱۳ درصد در مقایسه آزمون مرجع مشاهده می شود.

### ۳.۴ تاثیر فاصله سد ها از روزنه

همان طور که گفته شد، تصویر نمایش موقعیت سد به شکل نیم دایره ای با شعاع R است. نتایج بدست آمده از آزمایشات  $D_{31}R_1$ ,  $D_{31}R_2$ ,  $D_{31}R_3$ ,  $D_{31}R_4$  و  $D_{31}R_5$  در اینجا بحث شده است. این آزمایشات ( $D_{31}$ ) نشان دهنده عمق شستشو در میان آزمایشات هستند. برای بررسی تاثیر فاصله سد از روزنه، سد های بیشتری با افزایش R اضافه می شوند و I یکسان باقی می ماند. شکل (10a,b) نشان دهنده تاثیر r بر ویژگی های مخروط شستشو است. همانطور که نشان داده شد، برای  $q=14.5$  l/s و  $Q=10$  L/S و  $R/D_{orifice}=3.16$ ، عمق نسبی شستشوی بدست آمده



۰,۹۶ و ۰,۷۲ است که در مقایسه با آزمایش مرجع افزایش ۱۳ و ۱۵ درصدی دارد. برای مقادیر بالای  $R$ ، عمق نسبی مخروط شستشو کاهش می یابد. همان طور که می توان مشاهده کرد،  $R/D_{orifice} = 5.26$ ، عمق نسبی شستشو به مقدار داده شده در آزمایش مرجع نزدیک است.

به علاوه، برای جریان خروجی  $14.5L/S$ ، مقدار  $R_{hole}/D_{orifice}$  برای آزمایش مرجع ۱,۵۸ بود در حالیکه برای  $R/D_{orifice} = 5.26$  این مقدار ۵,۳۲ بود. همچنین، برای جریان خروجی  $10L/S$ ، مقدار  $R_{hole}/D_{orifice}$  برای آزمایش مرجع برابر ۱,۸ بود، در حالی که برای  $R/D_{orifice}$  برابر ۵,۲۶ است. به عبارت دیگر، مقدار متناسب با شعاع مخروط شستشو در آزمایش  $D_{31}R_4$  برابر ۳,۳۹ و ۳,۳۷ برابر آزمایش مرجع برای خروجی ۱۴,۵ و ۱۰ لیتر می باشد. مشاهده شد که مقدار  $R/D_{orifice}$  بیشتر از  $R_{hole}/D_{orifice}$  است. با توجه به تحلیل ها می توان بیان کرد که با افزایش  $R$ ، نقطه تزریق جریان دارای فشار کشش بیشتر خواهد بود و منطقه بستری گسترده تری شستشو داده می شود. برای مقادیر بالاتر  $R$ ، این نقطه شستشو در نزدیکی روزنه می باشد و به سمت جریان بالا دستی پیش می رود. در این مورد، فاکتور اصلی برای حذف رسوب، گسترش حالت جریان محدود است. برای مقادیر کمتر  $R$ ، فرایند شستشو از جریان اصلی سد شروع می شود و به سمت روزنه از طریق ترکیب گرداب های نعل اسبی و همچنین گرداب های مرکزی پیش می رود. برای  $R/D_{orifice} > 3.16$ ، سدها تاثیرات وارونه بر عمق مخروط شستشو می گذارند اما باعث شستشوی منطقه گسترده ای می شود.

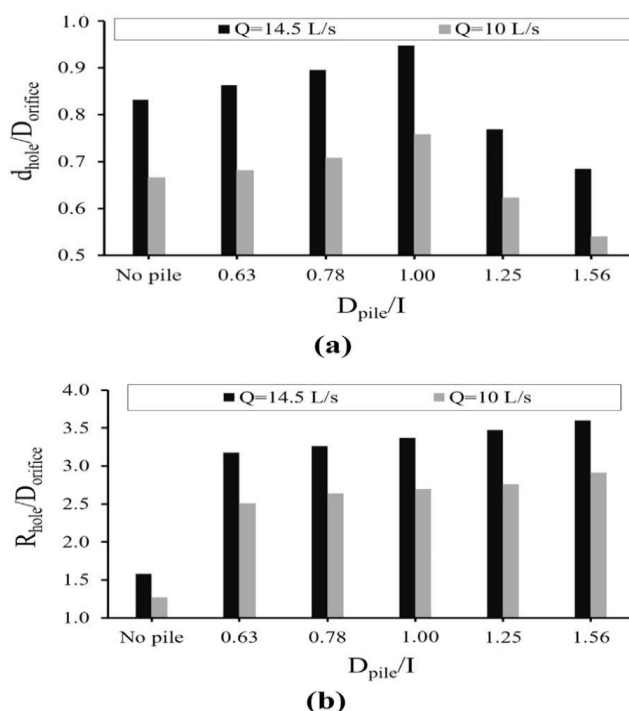
### ۳,۵ اختلاف زمانی در مخروط های شستشو

شکل ۱۱ نشان می دهد که چگونه مخروط شستشوی شکل گرفته در طول زمان پیشرفت می کند. همانطور که توسط ورودی دهانه روزنه مشاهده می شود، شستشو ابتدا در نزدیکی روزنه اتفاق می افتد و سپس بصورت منظم به سمت جریان اصلی به شکل نیمه مخروط ادامه می یابد. سرعت شستشو در مرحله اول فرایند شستشو بسیار زیاد بود و سرعت پیشرفت زمان هم افزایش قابل توجه داشت. از اینرو، فرایند شستشو در نوک هر سد آغاز می شود و سپس به طرفین ادامه می یابد. شکل نهایی مخروط شستشو مخروط نیم دایره است و شبیه به آزمون مرجع است، اما قطر آن دو برابر آزمایش مرجع است. بعد از ۶ ساعت، شرایط تعادل حاصل می شود و دیواره های مخروط شستشو ثابت می

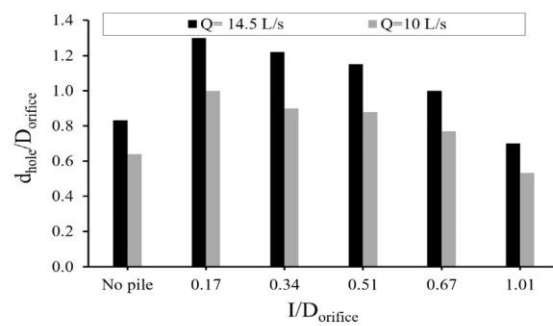
شود. حدود ۲۴۰ دقیقه بعد از انجام آزمایش، سرعت های مختلف در مخروط شستشو کاهش می یابد و سپس شکل نهایی مخروط شستشو بعد از یک ساعت شکل می گیرد و بعد از آن پیشرفت بیشتر اتفاق نمی افتد.

### ۳,۶ کارایی شستشو

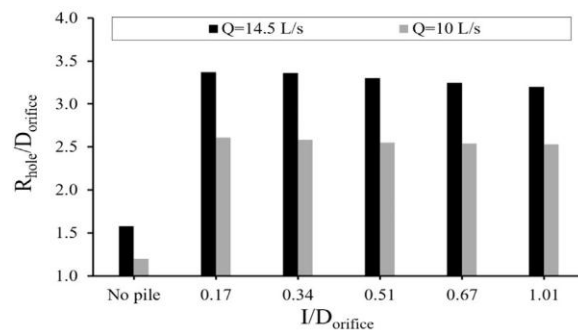
برای محاسبه حجم مخروط شستشو در این تحقیق، نقاط X,Y,Z در مخروط شستشو اندازه گیری شدند و سپس وارد نرم افزار SUPFER10 شدند. شکل (12a,b) نشان دهنده یک نقشه برجسته و ۳ بعدی از مخروط شستشو در آزمایش D2I4E3 است که توسط نرم افزار SUPFER10 به دست آمده است. برای آزمایش مرجع، در این تحقیق، همانند آزمایش D3I1R4 (آزمایش بیشترین تاثیر)، کارایی شستشو به ۰,۰۰۳۲۴ رسید که دلالت بر تاثیر قابل توجه ساختار سد های نیمه محصور بر ارتقای کارایی شستشو دارد. امامقلیزاده، و فتحی مقدم در (۶) کارایی شستشوی ۰,۰۰۳۴۲ را برای موقعیت های تجربی خود گزارش کردند. موریس و فان (۷) با بررسی بعضی از مخازن جهان ، ۰,۰۰۰۱۷ تا ۰,۰۴۳ را برای کارایی شستشو گزارش دادند. بازه وسیع و گسترده کارایی شستشو در تحقیقات مختلف به دلیل اختلاف در شرایط جریان-ویژگی های رسوب - هندسه خروجی پایین و مدت زمان شستشو است. این فاکتورها می توانند تاثیرات قوی بر کارایی شستشو داشته باشند.



شکل ۸. اختلاف در مخروط شستشو در ارتباط با عمق  $b$  و شعاع  $a$  و قطر سد

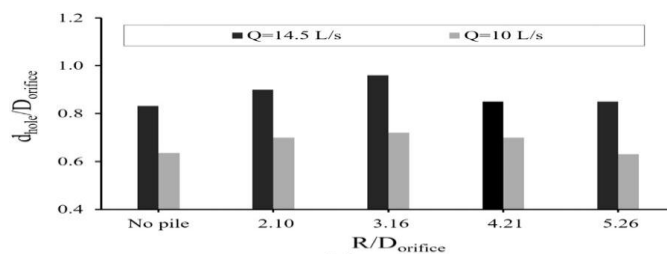


(a)

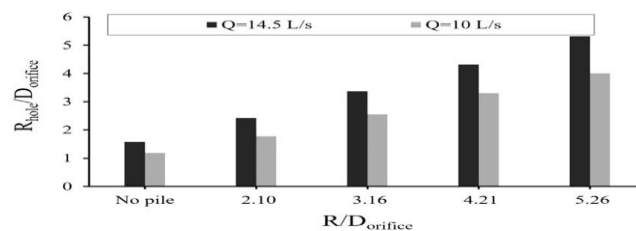


(b)

شکل ۹. اختلاف در مخروط شستشو در ارتباط با عمق  $b$  و شعاع  $a$  و فاصله های سد ها از هم

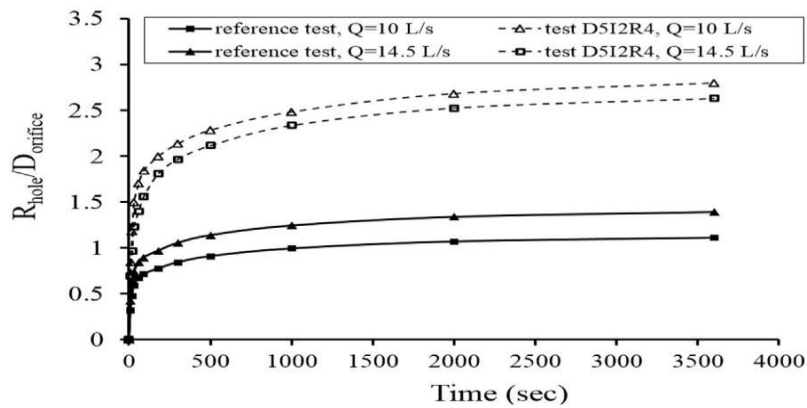
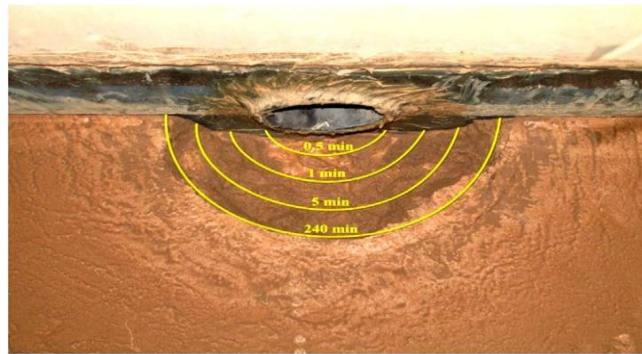


(a)

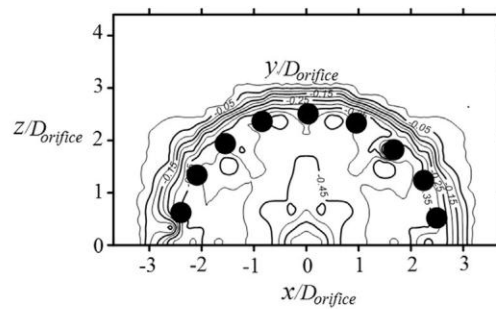


(b)

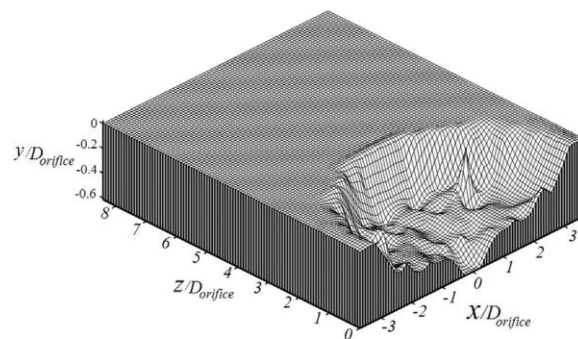
شکل ۱۰. اختلاف در مخروط شستشو در ارتباط با عمق  $b$  و شعاع  $a$  و فاصله های سد ها از روزنه



شکل ۱۱. اختلاف زمانی مخروط شستشو در آزمایش مرجع (بالا) و مقایسه با آزمایش D5I2R4 (پایین)



(a)



(b)

شکل ۱۲. (a) نقشه برجسته و (b) نقشه سه بعدی مخروط شستشو در آزمایش  $D2I4R3$

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، ویژگی های جریان و شستشوی رسوب در جریان اصلی روزنه بزرگ در شرایط جمع شدن رسوب روی ورودی روزنه بررسی شده اند. سپس، یک ساختار سد نیمه محصور برای تقویت قدرت جریان روزنه با هدف افزایش کارایی حذف رسوبات مورد استفاده قرار گرفت. تاثیر ویژگی های هندسی سازه های معرفی شده بر ابعاد روزنه شستشو بررسی شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از ساختار فرض شده، عمق نسبی و شعاع روزنه افزایش می یابد. با توجه به این مطلب، می توان بیان کرد که قطر سد ها تاثیر قابل توجهی بر ابعاد منطقه شستشو دارد. مشاهده شد که با افزایش فضای سد ها، حداکثر عمق روزنه ابتدا افزایش می یابد و سپس کاهش می یابد. به علاوه، بیان شد که با افزایش فاصله سد ها از مخروط شستشو، رسوب زیادی از مخروط شسته می شود. سپس، با افزایش زمان مشاهده شد که در شرایط وجود سازه های معرفی شده، میزان رشد روزنه افزایش قابل توجهی پیدا می کند. مشاهدات دلالت بر این دارد که مقدار رسوب شسته شده افزایش ۲۵ درصدی در مقایسه با آزمایش مرجع دارد.

#### References

- [1] J. Ahn, Numerical Modeling of Reservoir Sedimentation and Flushing Processes (Ph.D. thesis), Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2011, p. 158.
- [2] D. Bryant, A. Khan, N. Aziz, Investigation of flow upstream of orifices, J. Hydraul. Eng. 1 (98) (2008) 98–104.
- [3] H. Chanson, S.I. Aoki, M. Maruyama, Unsteady two-dimensional orifice flow: a large-size experimental investigation, J. Hydraul. Res. 40 (1) (2002) 63–71.
- [4] T. Carstens, H.R. Sharma, Local scour around large obstructions, in: Proceedings of the 16th Congr., Proc Int. Assoc. for Hydraul. Res., 1975.
- [5] K. Elliott, C. Baker, Effect of pier spacing on scour around bridge piers, J. Hydraul. Eng. 7 (1105) (1985) 1105–1109.
- [6] S. Emamgholizadeh, M. Fathi-Moghadam, Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs, J. Hydrol. Eng. ASCE 19 (2014) 674–681.
- [7] S. Emamgholizadeh, M. Bina, M. Fathi-Moghadam, M. Ghomeyshi, Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir, ARPN, J. Eng. Appl. Sci. 1 (4) (2006) 7–16.
- [8] M.K. Goyal, Fluid Mechanics and Hydraulic Machines, PHI learning Pvt. Ltd, Delhi, India, 2015, p. 792.
- [9] D. Fang, S. Cao, An experimental study on scour funnel in front of a sediment flushing outlet of a reservoir, 1.78-1.84, in: Proc. 6th Federal Interagency Sedimentation Cont., Las Vegas, 1996.

- [10] A. Hussain, Z. Ahmad, G.L. Asawa, Discharge characteristics of sharp-crested circular side orifices in open channels, *Flow Meas. Instrum.* 21 (3) (2010) 418–424.
- [11] H.S. Kim, M. Nabi, I. Kimura, Y. Shimizu, Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders, *Adv. Water Resour.* 70 (2014) 131–147.
- [12] M.B. Mashahir, A.R. Zarrati, A.R. Rezayi, Time development of scouring around a bridge pier protected by collar, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Scour and Erosion, ICSE-2*, Singapore, 2004.
- [13] B.W. Melville, Local Scour at Bridge Sites, (Ph.D. thesis), School of Engineering, University of Auckland, New Zealand, 1975, p. 259 Report No. 117.
- [14] B.W. Melville, Y.M. Chiew, Time scale for local scour at bridge piers, *J. Hydraul. Eng. ASCE* 125 (1999) 59–65.
- [15] B. Melville, A. Hadfield, Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures, *J. Hydraul. Eng.* 11 (1221) (1999) 1221–1224.
- [16] M.E. Meshkati Shahmirzadi, A.A. Dehghani, G. Naser, S. Emamgholizadeh, A. Mosaedi, Evolution of developing flushing cone during the pressurized flushing in reservoir storage, *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 3 (2009) 10–27.
- [17] G.L. Morris, J. Fan, *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watershed for Sustainable Use (Electronic Version)*, McGraw Hill, New York, 2010.
- [18] D.N. Powell, Sediment transport upstream of Orifice (Ph.D. Dissertation), Graduate School of Clemson University, South Carolina, United States, 2007 (UMI Number: 3290698).
- [19] D.N. Powell, A.A. Khan, Scour upstream of a circular orifice under constant head, *J. Hydraul. Res.* 50 (1) (2012) 28–34. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2011.637821>.
- [20] D. Powell, A. Khan, Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions, *J. Hydraul. Eng.* (2014) 04014076.
- [21] N. Qian, Reservoir sedimentation and slope stability; technical and environmental effects, in: *Proceedings of the 14th International Congress on Large Dams, Transactions. Rio de Janeiro, Brazil*, vol. 3, 1982, pp. 639–690.
- [22] A. Raudkivi, Functional trends of scour at bridge piers, *J. Hydraul. Eng.* 1 (1)(1986) 1–13.
- [23] Y. Shammaa, D. Zhu, N. Rajaratnam, Flow upstream of orifices and sluice gates, *J. Hydraul. Eng.* 2 (127) (2005) 127–133.
- [24] V.L. Streeter, E.B. Wylie, K.W. Bedford, *Fluid mechanics*, ninth edition, Tata McGraw-Hill Education, India, 2010, p. 562.
- [25] H. Sun, Y. Liu, Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes, *J. Hydraul. Res.* (2015). <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2015.1076533>