

## Investigation of the Impacts of Submerged Vanes on Pressurized Flushing in Reservoirs

SEPIDEH BEIRAMIPOUR<sup>1</sup>, KOUROSH QADERI<sup>1\*</sup>, MAJID RAHIMPOUR<sup>1</sup>, MOHAMMAD M. AHMADI<sup>1</sup>, SAMEH A.

KANTOUSH<sup>2</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan.

(Received: Feb. 25, 2020- Revised: June. 14, 2020- Accepted: July. 13, 2020)

### ABSTRACT

Pressurized flushing is one of the techniques for evacuating sediments from reservoirs. In this study, the impact of submerged vanes on performance of pressurized flushing were investigated. For this purpose, submerged vanes with convergent, divergent and combined arrangements in three distances from the bottom outlet ( $L_v$ ), three middle distances ( $L_{hr}$ ) and three heights above the sediment bed ( $H_{sv}$ ) were used and the results were compared with the non structural test (reference test). The results showed that the submerged vanes by creating rotational flow and turbulence, enhanced the performance of flushing and also by evacuating much sediment below the bottom outlet, the amount of evacuated sediments increased in all experiments. As, in the convergent and divergent arrangements, the volume of evacuated sediments increased respectively 6.5 and 48 times compared to the non structural test. Also, in the combined arrangement with two-row divergent of submerged vanes, in  $\frac{L_{hr}}{D_o}=0.5$ ,  $\frac{L_v}{D_o}=0.3$  and  $\frac{H_{sv}}{D_o}=1$ , the volume of flushing cone increased 51 times compared to reference test. Finally, by using a polynomial correlation with vane spacing, a non-dimensional equation for estimating the scour cone volume was proposed.

**Keywords:** Hydraulic Flushing, Submerged Vanes, Sediment Flushing Cone, Reservoirs.

---

\* Corresponding Author's Email: [kouroshqaderi@uk.ac.ir](mailto:kouroshqaderi@uk.ac.ir)

## بررسی تأثیر قرارگیری صفحات مستغرق در میزان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن سدها

سپیده بیرامی پور<sup>۱</sup>، کورش قادری<sup>۱\*</sup>، مجید رحیم پور<sup>۱</sup>، محمد مهدی احمدی<sup>۱</sup> و سامح احمد قنطوش<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲. موسسه تحقیقات پیشگیری از بلایا (DPRI)، دانشگاه کیوتو، کیوتو، ژاپن.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۲۳)

### چکیده

رسوب‌شویی تحت فشار (فلاشینگ) یکی از راه‌حل‌های تخلیه رسوبات مخازن سدها است. در این مطالعه تأثیر قرارگیری صفحات مستغرق بر میزان عملکرد رسوب‌شویی تحت فشار در مخازن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از صفحات مستغرق با آرایش‌های همگرا، واگرا و ترکیبی در سه فاصله صفحات تا دریچه تخلیه کننده تحتانی ( $L_p$ ) و سه فاصله میانی بین صفحات ( $L_{hr}$ ) با سه ارتفاع متفاوت ( $H_{sv}$ ) استفاده شد و نتایج با آزمایش بدون سازه مقایسه گردید. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از صفحات مستغرق با ایجاد جریان گردابی و تلاطم موجب تقویت عملکرد فلاشینگ شده و با تخلیه رسوبات بیشتری از زیر دریچه تخلیه کننده تحتانی، در تمامی آزمایش‌ها حجم چاله رسوب‌شویی را افزایش می‌دهد. به گونه‌ای که در آرایش‌های همگرا و واگرا به ترتیب افزایش ۶/۵ و ۴۸ برابری حجم رسوبات تخلیه شده نسبت به آزمایش بدون سازه مشاهده گردید. همچنین در هنگام استفاده از صفحات ترکیبی دو ردیفه در آرایش واگرا با فواصل نسبی  $\frac{L_{hr}}{D_o} = 0.5$ ،  $\frac{L_p}{D_o} = 0.3$  و ارتفاع نسبی  $\frac{H_{sv}}{D_o} = 1$ ، حجم چاله رسوب‌شویی به میزان ۵۱ برابر نسبت به آزمایش شاهد افزایش یافت. در پایان با استفاده از روش همبستگی چند جمله‌ای، رابطه بین فواصل صفحات و مقدار رسوبات شسته شده به صورت یک معادله بدون بعد ارائه گردید.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب‌شویی هیدرولیکی، صفحات مستغرق، مخروط رسوب‌شویی، مخزن سد.

(Abdollahpour and Hossein zadeh dalir, 2013).

### مقدمه

یکی از معمول‌ترین روش‌ها جهت کاهش مقدار رسوبات ورودی از حوضه آبریز به مخازن سد رسوب‌شویی هیدرولیکی است. رسوب‌شویی هیدرولیکی به روشی گفته می‌شود که در آن با باز کردن دریچه‌های تخلیه تحتانی، رسوباتی که از قبل در مخزن سد نهشته شده‌اند به همراه جریان از مخزن خارج می‌شوند. به طور کلی بسته به اینکه زمان انجام رسوب‌شویی ارتفاع آب مخزن نسبت به تخلیه کننده تحتانی چگونه باشد می‌توان رسوب‌شویی هیدرولیکی را به دو صورت آزاد و تحت فشار تقسیم‌بندی کرد (Mooris and Fan, 2009).

در روش رسوب‌شویی هیدرولیکی آزاد ارتفاع آب داخل مخزن توسط دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی پایین آورده شده و مخزن به طور کامل تخلیه می‌شود و در مخزن جریان رودخانه‌ای برقرار می‌شود. در روش رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت فشار ارتفاع آب بالاتر از تراز دریچه تخلیه تحتانی بوده و با باز کردن دریچه تخلیه تحتانی جریان ایجاد شده در داخل مخزن باعث ایجاد نیروی فرساینده بر روی رسوبات نهشته شده می‌گردد و رسوبات

رسوب‌گذاری یکی از بزرگترین مسائلی است که در مخازن سدها پیامدهای فراوانی را به همراه دارد. رسوب‌گذاری به تدریج حجم ذخیره مخزن را کاهش داده و در نهایت توانایی تأمین آب و تولید برق را کاهش می‌دهد (White, 2000). علاوه بر کاهش حجم مفید مخازن، می‌توان به ورود رسوبات به دریچه‌های نیروگاه و اختلال در کار توربین‌ها و خوردگی آن‌ها، انسداد و گرفتگی آبیگرها، افزایش تراز بستر در بالادست مخزن و به دنبال آن گسترش دامنه و پهنه سیلاب و افزایش بار اضافی روی بدنه سد نیز اشاره کرد (Morris and Fan, 2009). از طرف دیگر افزایش سطح آب زیرزمینی، کاهش ظرفیت طبیعی رودخانه در کنترل سیلاب و انحراف یا عقب‌نشینی آب مجموعه‌ای از آثار منفی رسوب‌گذاری در بالادست سد است (Tigrek and Aras, 2011). بنابراین رسوب‌زدایی امری ضروری است که برای حفظ ذخیره‌سازی طولانی مدت در مخازن سدها بکار می‌رود. اگر رسوب‌زدایی بطور صحیح انجام شود دیگر نیاز به ساخت سدهای جدید کم شده و می‌توان از هزینه‌های اضافی جلوگیری کرد

داد که استفاده از روش جت‌ها تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر افزایش راندمان رسوب‌شویی داشته و از بین پارامترهای متغیر، سرعت جت بیشترین تأثیر را در رسوب‌شویی دارد. *Madadi et al.* (2016)، از گروه پایه‌های شمع جهت افزایش میزان رسوب‌شویی استفاده کردند و شاهد افزایش ابعاد مخروط رسوب‌شویی و حجم رسوبات تخلیه‌شده بودند. همچنین در سال ۲۰۱۷، به بررسی راندمان عملیات فلاشینگ در بالادست یک روزنه بزرگ پرداختند. آنها با استفاده از یک سازه نیم استوانه در بالادست تخلیه‌کننده تحتانی مخزن سد میزان آبشستگی و ابعاد چاله رسوب‌شویی را اندازه‌گیری کرده و به این نتیجه رسیدند که راندمان رسوب‌شویی تحت فشار با نصب این سازه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. *Mahtabi et al.* (2018)، تأثیر تعداد ردیف، ارتفاع و آرایش صفحات مستغرق در رسوب‌شویی مخزن سد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که در آرایش موازی، با کاهش تعداد صفحات، عملکرد رسوب‌شویی افزایش می‌یابد به طوری که در صفحات یک ردیفه بهترین رسوب‌شویی مشاهده شد. با فاصله گرفتن صفحات از مقابل دریچه و دور شدن از جت جریان ورودی به دریچه، تأثیر صفحات ردیف‌های بعدی در تشدید رسوب‌شویی کاهش یافت. همچنین در آرایش موازی، صفحات با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری نسبت به صفحات ۲/۵ سانتی‌متری عملکرد بهتری در تشدید رسوب‌شویی داشتند. در آزمایش‌ها با آرایش شعاعی، عملکرد رسوب‌شویی صفحات افزایش چشمگیری داشت. همچنین در آرایش شعاعی، عملکرد رسوب‌شویی صفحات با ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متری بهتر از صفحات ۱۰ سانتی‌متری بود. جدول (۱) میزان افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی با استفاده از سازه‌های مختلف استفاده شده، در تحقیقات قبل را نشان می‌دهد.

#### معرفی تکنیک صفحات مستغرق

تکنیک صفحات مستغرق یکی از روش‌های کنترل و مدیریت رسوبات در رودخانه‌ها و مجاری آبرفتی است که در دهه‌های اخیر تئوری و اصول طراحی آن توسعه داده شده است. صفحات مستغرق یکی از روش‌های مؤثر جهت حفاظت سواحل رودخانه‌ها در مقابل فرسایش، جلوگیری از ورود رسوبات به سازه‌های آبگیری از رودخانه و تعمیق بستر رسوبی و تثبیت خط القعر رودخانه است. محققین زیادی به بررسی عملکرد صفحات مستغرق و غیر مستغرق پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تنها صفحات مستغرق در عمل مفید واقع می‌شوند.

به‌طور کلی صفحات مستغرق سازه‌هایی هستند که به‌منظور تشدید رسوب‌شویی می‌توان مورد استفاده قرار داد زیرا ایجاد جریان گردابی کرده و تلاطم را افزایش می‌دهند. صفحات

به همراه جریان از دریچه خارج می‌گردد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه رسوب‌شویی تحت فشار انجام شده است اما مسأله مهمی که وجود دارد ارائه راهکاری جهت افزایش راندمان رسوب‌شویی و حجم رسوبات تخلیه شده است. تحقیقاتی در این زمینه با ارائه راهکارهای سازه‌ای انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

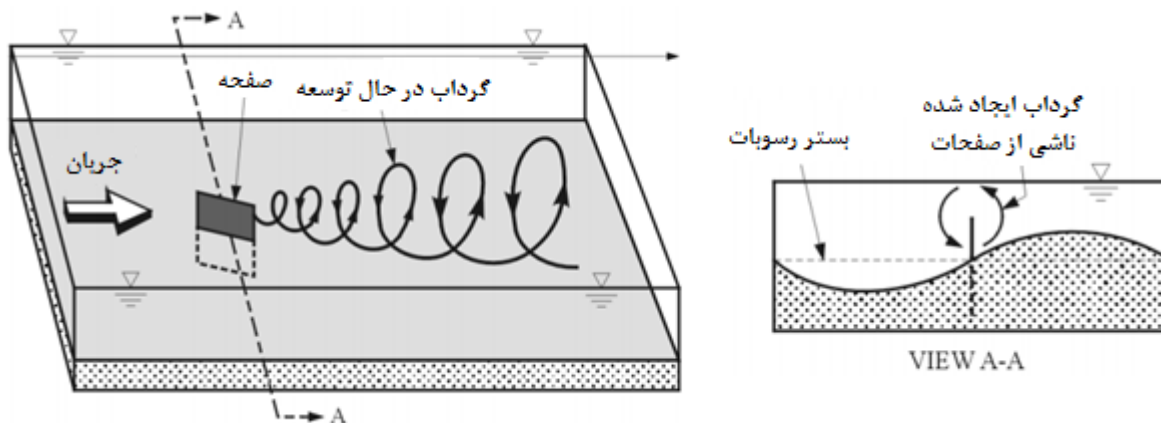
*Ahadpour Dodaran et al.* (2012)، در مطالعه خود به بررسی استفاده از لرزاننده‌ها در لایه‌های رسوبی و محل قرارگیری آنها روی حجم و ابعاد مخروط رسوب‌شویی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که وجود لرزاننده در داخل رسوبات پشت مخزن تأثیر مثبت بر ابعاد حفره رسوب‌شویی دارد و موقعیت لرزاننده نسبت به محور سد و همچنین میزان فرکانس آنها، پارامترهای اصلی مؤثر روی ابعاد مخروط رسوب‌شویی است. *Jalili and Hossein zadeh dalir* (2012)، با بکارگیری سازه نیم استوانه و ایجاد یک اندازه شکاف روی سازه نیم استوانه تحقیقاتی در مورد رسوب‌شویی تحت فشار روی مدل آزمایشگاهی انجام دادند. آنها بیان نمودند که با افزایش قطر سازه نیم استوانه مقدار تخلیه رسوبات افزایش می‌یابد. *Abdollahpour and Hossein zadeh dalir* (2013) و *Mohammadi et al.* (2014)، در تحقیقی با کارگذاری سازه نیم استوانه شکاف‌دار در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی تأثیر این سازه در ایجاد جریان گردابی برای تخلیه رسوبات را مورد آزمایش قرار داده و شاهد تأثیر مثبت این سازه در افزایش ابعاد مخروط رسوب‌شویی بودند. *Jenzer Althaus et al.* (2015)، با قرار دادن جت آب در مخزن میزان تأثیر آن را بر میزان رسوبات تخلیه‌شده مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که استفاده از جت آب، در رسوب‌شویی بسیار مؤثر است. *Abdollahpour and Hossein zadeh dalir* (2016)، از سازه‌های تشدیدکننده رسوب‌شویی همانند شمع و صفحات مستغرق در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی استفاده کرده و تأثیر این سازه‌ها در ایجاد جریان گردابی برای تخلیه رسوبات را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد زمانی که فاصله شمع از همدیگر نسبت به قطر دریچه تخلیه‌کننده تحتانی برابر ۱/۵ باشد قدرت جریان گردابی اطراف شمع بیشتر می‌گردد. در این تحقیق همچنین از سازه صفحات مستغرق در داخل مخزن استفاده گردید. بررسی‌ها نشان داد به ازای یک دبی ثابت، بیشترین میزان رسوبات تخلیه‌شده مربوط به حالتی است فاصله صفحات مستغرق از دیواره پایین‌دست نسبت به دریچه تخلیه‌کننده برابر ۰/۳ باشد و هر چه زاویه قرارگیری صفحات نسبت به راستای جریان کمتر باشد حجم رسوب‌شویی بیشتر می‌شود. *Abdipor et al.* (2016)، به بررسی میزان تأثیر جت در افزایش رسوب‌شویی مخازن پرداختند. آزمایش‌ها نشان

سرعت رو به بالا و در سمت کم فشار مؤلفه سرعت رو به پایین ایجاد می‌شود. این مؤلفه‌های قائم سرعت، موجب تشکیل گردابه‌هایی در پشت لبه انتهایی صفحه می‌شوند. گردابه‌ها در محلی، کمی پایین‌تر از یال فوقانی صفحه، در هم می‌پیچند و منشأ شکل گیری گردابه‌ای بزرگتر می‌شوند که ضمن چرخش در صفحه قائم عمود بر جریان، به همراه جریان اصلی در جهت پایین دست امتداد می‌یابد. این جریان چرخشی سبب تغییراتی در تنش برشی بستر، توزیع عرضی رسوبات و توپوگرافی بستر رسوبی می‌گردد (Odgaard and Wang, 1991). رفتار هیدرولیکی صفحات مستغرق و پروفیل بستر ناشی از سمت پرفشار و کم فشار صفحه در شکل (۱) نمایش داده شده است.

مستغرق به صورت قائم و با زاویه‌ای کم نسبت به جریان نزدیک شونده در بستر آبراهه نصب می‌شوند. با استقرار صفحه مستغرق، جریان‌های ثانویه در دو طرف آن تولید می‌شود که با امتداد یافتن در جهت پایین دست، جریان چرخشی بزرگتری ایجاد می‌کنند. شکل گیری جریان‌های ثانویه به دلیل وجود گرادیان قائم فشار در هر دو طرف صفحه است. وجهی از صفحه که مستقیماً در معرض جریان نزدیک شونده بالادست قرار دارد؛ سمت پرفشار نامیده می‌شود. در این سمت، در امتداد ارتفاع صفحه، فشار از پایین به بالا کاهش می‌یابد. در وجه مقابل که سمت کم فشار نامیده می‌شود، فشار از پایین به بالا افزایش می‌یابد. در نتیجه توزیع معکوس فشار در دو طرف صفحه، جریانی ثانویه از سمت پرفشار به سمت کم فشار برقرار می‌شود و به عبارت دیگر، در سمت پرفشار، مؤلفه

جدول ۱- میزان افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی با استفاده از راهکارهای سازه‌ای در تحقیقات پیشین

نام محقق	سازه مورد استفاده	میزان افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی
Ahadpour Dodaran <i>et al.</i> (2012)	لرزانده‌ها	۳/۷۳ برابر (۲۷۳ درصد)
Jalili and Hossein zadeh dalir (2012)	سازه نیمه استوانه شکاف دار	۱۵ برابر (۱۴۰۰ درصد)
Abdollahpour and Hossein zadeh dalir (2013)	سازه نیمه استوانه شکاف دار	۳۰ برابر (۲۹۰۰ درصد)
Mohammadi <i>et al.</i> (2014)	سازه نیمه استوانه شکاف دار	۱۰ برابر (۹۰۰ درصد)
Jenzer Althaus <i>et al.</i> (2015)	جت آب	۲ برابر (۱۰۰ درصد)
Abdollahpour and Hossein zadeh dalir (2016)	شمع	۲/۴۱ برابر (۱۴۱ درصد)
Abdollahpour and Hossein zadeh dalir (2016)	صفحات مستغرق	۴/۳۷ برابر (۳۳۷ درصد)
Abdipor <i>et al.</i> (2016)	جت آب	۲/۸ برابر (۱۸۰ درصد)
Madadi <i>et al.</i> (2016)	شمع	۳/۵ برابر (۲۵۰ درصد)
Madadi <i>et al.</i> (2017)	سازه PBC	۴/۵۷ برابر (۳۵۷ درصد)
Mahtabi <i>et al.</i> (2018)	صفحات مستغرق	۱۱/۳۳ برابر (۱۰۳۳ درصد)



شکل ۱- نمایش شماتیک صفحات مستغرق و پروفیل بستر ایجاد شده ناشی از صفحات (Ouyang and Lai, 2006)

استفاده شده است (Melville, 1997; Soon Keat *et al.* 2005; Tafarajnoruz *et al.* 2012; Shafai Bajestan *et al.* 2015; Odgaard, 2017; Turkben, 2018) و تحقیقات اندکی در زمینه

همان‌گونه که ذکر شد تا به حال از صفحات مستغرق در بهبود عملکرد رودخانه‌ها، حفاظت از ساحل خارجی رودخانه‌ها، حفاظت از دهانه آبیگرها و جلوگیری از آبستگي پایه پل‌ها

(۲) مخزن اصلی (۳) قسمت خروجی شامل لوله خروجی و محفظه تله انداز رسوبات خارج شده از دریچه تخلیه کننده تحتانی (۴) سرریز مثلثی ۹۰ درجه جهت اندازه‌گیری دبی خروجی (۵) مخزن آبگذر. به منظور مشاهده رفتار جریان آب و رسوبات قسمت جلوی مخزن از جنس شیشه ساخته شده است که در مرکز آن و در فاصله ۴۵ سانتیمتری از کف مخزن توسط لوله‌ای به قطر داخلی ۱۰ سانتیمتر به محفظه تله انداز رسوب هدایت شده، که این جعبه دارای ابعاد ۱/۱ متر طول، ۰/۴۵ متر عرض و ۰/۳۵ متر ارتفاع می‌باشد. روی لوله، شیر فلکه‌ای جهت باز و بسته کردن جریان خروجی تعبیه شده است. شکل (۲) دید شماتیک مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

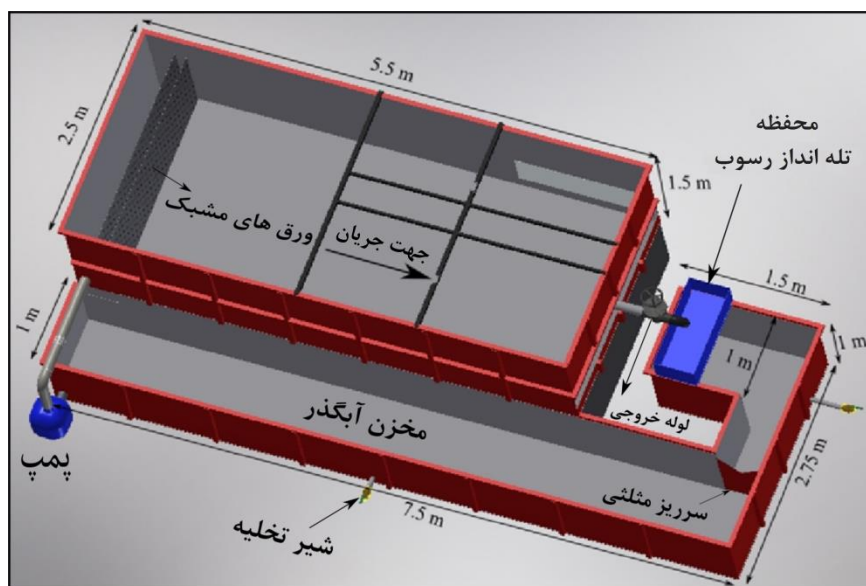
در داخل مخزن، رسوبات غیر چسبنده با مشخصات  $d_{50} = 0.73mm$ ،  $G_s = 2.625 \frac{gr}{cm^3}$ ،  $C_u = 2.45$  و  $\sigma = 1.49$  که نشان دهنده توزیع یکنواخت ذرات می‌باشد، به صورت لایه لایه در مخزن ریخته شد. آزمایش‌ها شامل آزمودن بدون سازه (آزمایش شاهد) و آزمودن‌های با سازه صفحات مستغرق طراحی گردید. صفحات مستغرق از جنس ورق گالوانیزه به ترتیب با طول، ارتفاع و ضخامت ۱۵، ۴۵ و ۰/۲ سانتیمتر ساخته شدند. ابعاد صفحه بر اساس معیار تعیین شده توسط Odgaard and Kennedy (1983)، که در جدول (۲) آمده است محاسبه شد.

استفاده از صفحات مستغرق در رسوب شویی مخازن سدها انجام گرفته است. هدف از این تحقیق تشدید گردابه‌های ناشی از کارگذاری صفحات مستغرق در مخزن، جهت افزایش میزان رسوب‌شویی می‌باشد. بدین منظور از آرایش‌های مختلف همگرا و واگرا در سه فاصله صفحات تا دریچه تخلیه کننده تحتانی، سه فاصله میانی بین صفحات و سه ارتفاع صفحات بالای بستر رسوبات استفاده گردید. جهت تکمیل آزمایش‌ها، آرایش‌های ترکیبی بر اساس نتایج قسمت قبل طراحی و انجام شد، همچنین حجم مخروط رسوب‌شویی محاسبه و با آزمایش شاهد (بدون سازه) مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی مخزن سد واقع در آزمایشگاه هیدرولیک و سازه‌های آبی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. مدل فیزیکی مورد نظر به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۷/۵ متر طول، ۳/۵ متر عرض و ۱/۸ متر ارتفاع می‌باشد. این مدل شامل ۵ قسمت اصلی است: (۱) قسمت ورودی شامل پمپ سانتریفیوژ، لوله انتقال آب و ورق‌های مشبک جهت آرام کردن جریان که در فاصله ۵۰ سانتیمتری از ابتدای مخزن واقع شده‌اند.



شکل ۲- نمایش سه بعدی مدل فیزیکی

جدول ۲- محاسبه ابعاد صفحات مستغرق

پارامتر	توصیه Odgaard and Kennedy (1983)
نسبت ارتفاع به طول صفحات مستغرق ( $H/L$ )	$0.1 < H/L < 0.5$
نسبت ارتفاع صفحات مستغرق به عمق جریان ( $H/d$ )	$0.2 < H/d < 0.5$

صفحات مستغرق تا دریاچه تخلیه کننده تحتانی می‌باشد. بر اساس روش باکینگهام رابطه (۲) به دست می‌آید:

(رابطه ۲)

$$\frac{V_c}{D_o^3} = f_1\left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^3}}, \frac{H_w}{D_o}, \frac{H_s}{D_o}, \frac{d_{50}}{D_o}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{\rho_w D_o}{\mu}, \frac{H_{sv}}{D_o}, \frac{L_{sv}}{D_o}, \frac{L_{hr}}{D_o}, \frac{L_v}{D_o}\right)$$

با جایگذاری  $\frac{\rho_s}{\rho_w}$  به عنوان وزن مخصوص نسبی ( $G_s$ ) و  $\frac{\rho_w D_o}{\mu}$  به عنوان عدد رینولدز (Re) و ثابت بودن پارامترهای  $\frac{H_w}{D_o}$ ،  $G_s$ ،  $\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^3}}$ ،  $\frac{L_{sv}}{D_o}$ ،  $\frac{L_{hr}}{D_o}$  و  $\frac{L_v}{D_o}$ ، رابطه (۳) ایجاد می‌شود:

(رابطه ۳)

$$\frac{V_c}{D_o^3} = f_3\left(\frac{H_{sv}}{D_o}, \frac{L_{hr}}{D_o}, \frac{L_v}{D_o}\right)$$

بنابراین در این تحقیق پارامترهای بی‌بعد شده ارتفاع صفحات بالای رسوبات، فاصله میانی بین صفحات و فاصله صفحات تا خروجی و همچنین آرایش‌های مختلف صفحات مستغرق در ۶۷ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با آزمایش بدون سازه مقایسه گردید.

به‌علاوه در تمامی آزمایش‌ها دی، ارتفاع رسوبات و ارتفاع سطح آب به ترتیب ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه، ۴۰ سانتیمتر و ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. آرایش قرارگیری صفحات به همراه متغیرهای هر آرایش در جدول (۳) نمایش داده شده است. این نکته قابل‌ذکر است که جهت نمایش هر آزمایش از نام مدل آرایش و سه عدد که به ترتیب از چپ به راست: فاصله صفحات تا خروجی، فاصله میانی بین صفحات و ارتفاع صفحات می‌باشند، استفاده شده است.

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج تحقیقات انجام‌شده در آزمایش شاهد (بدون سازه)، آزمایش‌های آرایش همگرا (مدل A)، آزمایش‌های آرایش واگرا (مدل B) و آزمایش‌های ترکیبی (مدل‌های C تا O) ارائه می‌گردد. همچنین با تحلیل نتایج، بهترین فواصل و ارتفاع صفحات مستغرق و بهترین آرایش معرفی شده و نتایج آن با مابقی آرایش‌ها مقایسه می‌گردد.

#### آزمایش شاهد (بدون سازه)

در این آزمایش در لحظات اولیه، رسوبات از خروجی مخزن تخلیه شده و پس از گذشت ده تا پانزده دقیقه از شروع آزمایش، رسوب‌شویی کاهش می‌یابد و چاله رسوب‌شویی کوچکی پشت دریاچه تخلیه کننده تحتانی ایجاد می‌شود. شکل (۳) نمای سه بعدی توپوگرافی و خطوط تراز در این آزمایش را نشان می‌دهد.

بر اساس سناریوهای مختلف، صفحات مستغرق به آرامی در داخل رسوبات کار گذاشته شدند و مجدداً سطح رسوبات اطراف صفحات صاف گردید. برای شروع آزمایش به منظور برهم نخوردن سطح رسوبات و جلوگیری از فرسایش آنها، با استفاده از یک پمپ با دبی کم مخزن شروع به پر شدن از آب شد. پس از اینکه سطح آب به حد دلخواه رسید پمپ اصلی روشن شد و با استفاده از کنترلر حجمی واقع بر روی آن دبی موردنظر تنظیم گردید. زمانی که سطح آب درون مخزن به میزان تعریف‌شده رسید شیرفلکه موجود بر روی لوله خروجی مخزن باز شد و زمان آزمایش از همان لحظه آغاز گردید. در مدت تمامی آزمایش‌ها، سطح آب با استفاده از پوینت گیج‌های دو طرف مخزن کنترل می‌گردید. در لحظات اولیه آزمایش‌ها، غلظت رسوبات خروجی بسیار زیاد و به مرور زمان از آن کاسته شد. پس از ۳ ساعت از شروع آزمایش زمانی که چاله آبشستگی به حد تعادل رسید، پمپ سانتریفیوژ خاموش و شیرفلکه خروجی مخزن بسته و آب داخل مخزن توسط شیر تخلیه واقع در کف آن تخلیه شد. سپس صفحات مستغرق به آرامی به گونه‌ای که به چاله رسوب‌شویی آسیبی وارد نشود از داخل رسوبات خارج شدند. با استفاده از دوربین عکاسی Canon IXUS 190 که دارای توانایی کنترل از راه دور می‌باشد با استفاده از ریل موجود در بالای مخزن در نقاط مشخص شده عکس‌هایی گرفته و جهت کنترل و دقت بیشتر کار، ابعاد با استفاده از خط کش نیز برداشت شد. سپس تحلیل عکس‌ها و ابعاد برداشت‌شده به‌وسیله نرم‌افزار AGISOFTPhotoscan Professional انجام شد و حجم آن ( $V_c$ ) توسط نرم‌افزار Arc GIS محاسبه گردید و توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی با نرم‌افزار Surfer ترسیم شد. همچنین جهت اطمینان بیشتر از کار، رسوبات تخلیه‌شده در جعبه تله انداز رسوب پس از خشک شدن وزن گردید.

#### آنالیز ابعادی

حجم رسوبات تخلیه‌شده از خروجی مخزن تابعی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

(رابطه ۱)

$$V_c = f(Q_o, H_w, H_s, d_{50}, \rho_w, \rho_s, \mu, g, D_o, H_{sv}, L_{sv}, L_{hr}, L_v)$$

که ( $V_c$ ) حجم مخروط رسوب‌شویی، ( $Q_o$ ) دبی خروجی از دریاچه تخلیه کننده تحتانی، ( $H_w$ ) ارتفاع آب، ( $H_s$ ) ارتفاع بستر رسوبات، ( $d_{50}$ ) اندازه قطر متوسط ذرات، ( $\rho_s$ ) وزن مخصوص رسوبات، ( $\rho_w$ ) وزن مخصوص سیال، ( $\mu$ ) لزجت دینامیکی سیال، ( $g$ ) شتاب ثقل، ( $D_o$ ) قطر دریاچه تخلیه کننده تحتانی، ( $H_{sv}$ ) ارتفاع صفحه مستغرق بالای بستر رسوبات، ( $L_{sv}$ ) طول صفحه مستغرق، ( $L_{hr}$ ) فاصله میانی صفحات مستغرق و ( $L_v$ ) فاصله

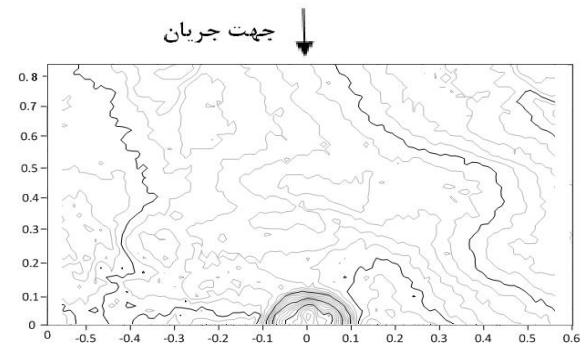
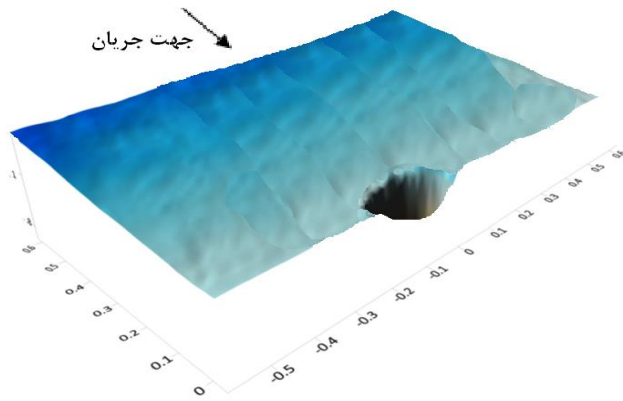
جدول ۳- آرایش‌های مختلف صفحات مستغرق و متغیرهای مورد استفاده

متغیرهای هر آرایش	شکل شماتیک آرایش	مدل	متغیرهای هر آرایش	شکل شماتیک آرایش	مدل
	آرایش واگرا		آرایش همگرا		
$L_v = 3,5,10 \text{ cm}$ $L_{hr} = 5,10,15 \text{ cm}$ $H_{sv} = 5,10,20 \text{ cm}$		B	$L_v = 3,5,10 \text{ cm}$ $L_{hr} = 5,10,15 \text{ cm}$ $H_{sv} = 10,20,30 \text{ cm}$		A
آرایش‌های ترکیبی					
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		E	$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		C
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف سوم}} = 10 \text{ cm}$		F	$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف سوم}} = 10 \text{ cm}$		D

متغیرهای هر آرایش	شکل شماتیک آرایش	مدل	متغیرهای هر آرایش	شکل شماتیک آرایش	مدل
	آرایش واگرا			آرایش همگرا	
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		J	$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		G
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 20 \text{ cm}$		K	$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		H
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		L	$H_{\text{صفحات ردیف سوم}} = 10 \text{ cm}$		I
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		M	$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		I

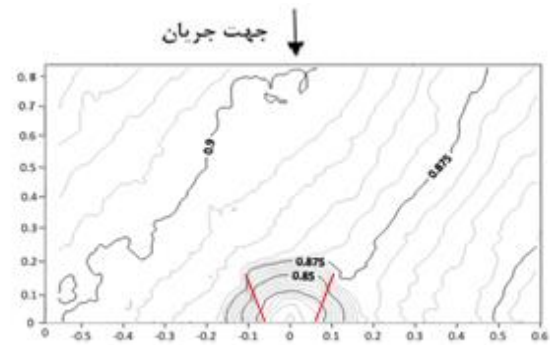
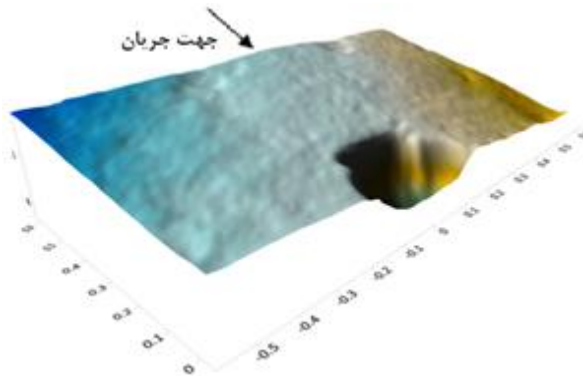


متغیرهای هر آرایش	شکل شماتیک آرایش	مدل	متغیرهای هر آرایش	شکل شماتیک آرایش	مدل
آرایش واگرا			آرایش همگرا		
$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		O	$H_{\text{صفحات ردیف اول}} = 10 \text{ cm}$ $H_{\text{صفحات ردیف دوم}} = 10 \text{ cm}$		N



شکل ۳- نمای سه بعدی توپوگرافی و نمودار خطوط تراز در آزمایش شاهد

را دارد، حجم مخروط رسوب‌شویی نسبت به آزمایش شاهد نزدیک به ۶/۵ برابر (۵۳۲/۵ درصد) افزایش یافته است. شکل (۴) نمای سه بعدی و توپوگرافی چاله رسوب‌شویی در این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمای سه بعدی توپوگرافی و نمودار خطوط تراز در آزمایش A:3, 15, 20

شویی را به خود اختصاص داده‌اند. با کاهش  $L_v$ ، عملکرد عملیات فلاشینگ ارتقا پیدا می‌کند به این دلیل که هر چه صفحات به دریچه تخلیه کننده تحتانی و جریان خروجی مخزن نزدیکتر می‌شوند فشار دینامیکی و گرداب نعل اسبی ناشی از اختلاف فشار بین دو طرف صفحه قوی‌تر شده و این امر موجب ایجاد گردابه‌های شدیدتر به سمت پایین‌دست

#### آرایش همگرا (مدل A)

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می‌گردد که در تمامی سناریوهای این آرایش حجم رسوب‌شویی افزایش یافته است به طوری که در آزمایش A:3, 15, 20 که بهترین نتیجه در این آرایش

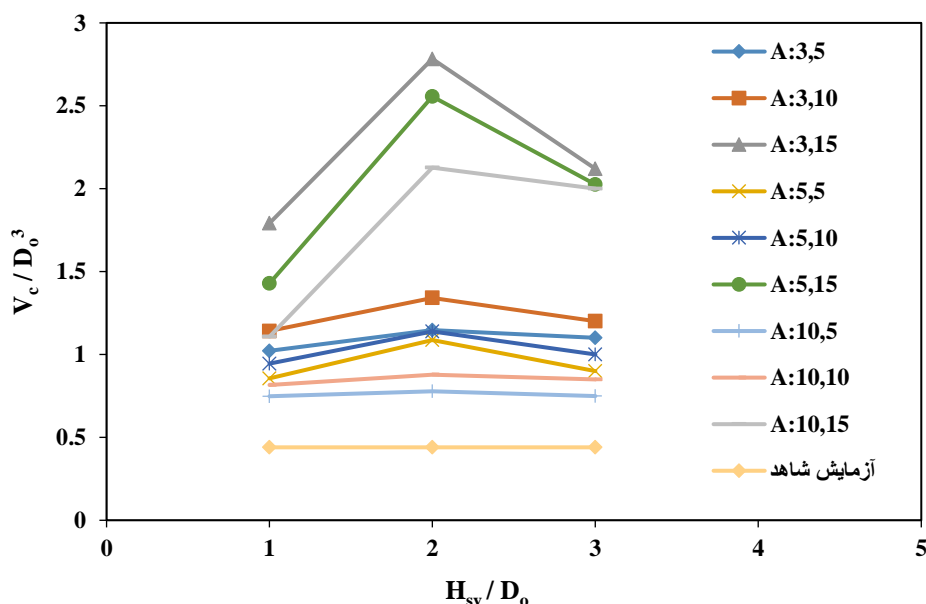
در این آرایش تأثیر سه پارامتر فاصله میانی بین صفحات  $(L_{hr})$ ، فاصله صفحات تا خروجی مخزن  $(L_v)$  و ارتفاع صفحات مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج شکل (۵) مشخص می‌شود که تأثیر  $L_{hr}$  در این آرایش بیش از  $L_v$  است، به گونه‌ای که در تمامی ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر، آزمایش‌های A:10,15 و A:5,15، A:3,15 به ترتیب بیشترین میزان رسوب

شد که در این آرایش هرچه ارتفاع صفحات بیشتر باشد عملکرد رسوب‌شویی بیشتر می‌شود. در این مطالعه با توجه به شکل (۵) مشخص می‌گردد که بیشترین میزان رسوب‌شویی به ترتیب در ارتفاع‌های ۲۰، ۳۰ و ۱۰ سانتیمتری اتفاق می‌افتد. در سری آزمایش‌های A:3,5، با افزایش ارتفاع صفحات از ۱۰ به ۲۰ سانتیمتر حجم چاله رسوب‌شویی حدود ۵۵ درصد و با افزایش از ۱۰ به ۳۰ سانتیمتر حجم چاله حدود ۱۸ درصد افزایش یافته است، که این روند در تمامی آزمایش‌ها رخ می‌دهد و نشان‌دهنده عملکرد بهتر صفحات ۲۰ سانتیمتری نسبت به مابقی ارتفاع‌ها می‌باشد. این امر بیانگر این مسأله است که پس از برخورد جریان به صفحات به علت ایجاد فشار دینامیک، جریان رو به پایین در جلوی آنها شکل می‌گیرد که این جریان باعث ایجاد تلاطم می‌شود. با افزایش ارتفاع صفحات روی بستر تا ۲۰ سانتیمتر جریان بیشتری با آنها برخورد کرده و قدرت جریان رو به پایین بیشتر شده و به مراتب رسوب‌شویی بیشتر می‌شود. با افزایش ارتفاع صفحات به ۳۰ سانتیمتر، عملکرد صفحات کاهش یافته و صفحات نقش مانع را در مقابل خروجی ایفا می‌کنند و همین امر موجب کاهش رسوب‌شویی می‌گردد.

صفحات و در نتیجه تخلیه بیشتر رسوبات می‌شود. به گونه‌ای که در صفحات با فاصله میانی ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر با کاهش  $L_v$  از ۱۰ به ۳، حجم چاله رسوب‌شویی به میزان تقریبی ۵۳ درصد افزایش یافته است. این نتیجه با نتایج تحقیقات (Abdollahpour and Hossein zadeh dalir و Mahtabi (2016) و *et al.* (2018) مطابقت دارد.

در رابطه با فاصله میانی بین صفحات، با کاهش  $L_{hr}$  میزان رسوب‌شویی افزایش می‌یابد به طوری که در صفحات با فاصله تا خروجی ۳ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر با افزایش  $L_{hr}$  از ۵ به ۱۵، حجم چاله رسوب‌شویی به میزان تقریبی ۱۴۳ درصد افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که در این آرایش به دلیل تنگ‌شدگی ناگهانی که اتفاق می‌افتد، کم بودن فاصله میانی صفحات موجب تنگ‌تر شدن مسیر تخلیه رسوبات شده و در نتیجه رسوبات کمتری به پایین دست منتقل می‌شود.

در این آرایش ارتفاع صفحات بالای بستر رسوبات در سه حالت ۱۰ سانتیمتر (برابر با قطر خروجی)، ۲۰ سانتیمتر (۲ برابر قطر خروجی) و ۳۰ سانتیمتر (۳ برابر قطر خروجی) مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیقات قبل با در نظر گرفتن دو ارتفاع صفحه (برابر با قطر خروجی و ۲ برابر قطر خروجی) چنین نتیجه گرفته

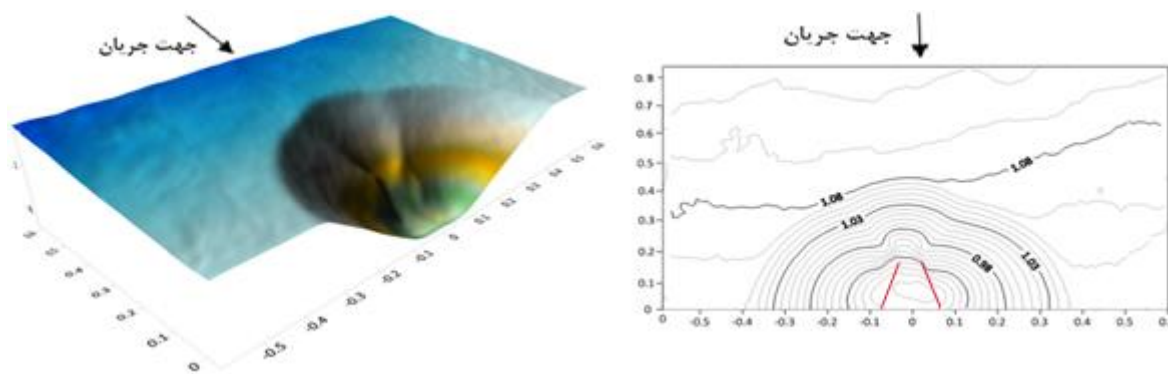


شکل ۵- تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی در سناریوهای مختلف آرایش همگرا (مدل A) نسبت به ارتفاع صفحات

است. شکل (۶) نمای سه بعدی و توپوگرافی چاله رسوب‌شویی در این آزمایش را نشان می‌دهد. این افزایش حجم چاله نسبت به مطالعات قبلی که در زمینه استفاده از راهکارهای سازه‌ای جهت تقویت رسوب‌شویی مخازن انجام شده است افزایش قابل توجه عملکرد عملیات رسوب‌شویی را نشان می‌دهد.

#### آرایش واگرا (مدل B)

حجم رسوب‌شویی در این آرایش در تمامی سناریوها بیشتر شده و افزایش قابل توجهی داشته است، به طوری که در آزمایش B:3, 10, 5 که بهترین نتیجه را در بردارد حجم رسوب‌شویی نسبت به آزمایش شاهد به میزان ۴۸ برابر (۴۶۹۵ درصد) افزایش یافته



شکل ۶- نمای سه بعدی توپوگرافی و نمودار خطوط تراز در آزمایش 3, 5, 10 B:

میزان تقریبی ۷۵۳ درصد افزایش یافته است. بنابراین چنین می توان نتیجه گرفت که در این آرایش تأثیر  $L_v$  بیش از  $L_{hr}$  است. جهت بررسی ارتفاع صفحات بالای بستر رسوبات، سه ارتفاع ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر مورد ارزیابی قرار گرفت. همان گونه در شکل (۷) مشاهده می شود میزان رسوب شویی در تمامی آزمایش ها به غیر از دو حالت B:3, 5 و B:3, 10، به ترتیب در ارتفاع های ۲۰، ۱۰ و ۵ سانتیمتر اتفاق می افتد. به طور کلی پس از برخورد جریان به صفحات به علت ایجاد فشار دینامیک، جریان رو به پایین در جلوی آنها شکل می گیرد که این جریان باعث ایجاد تلاطم می شود. با افزایش ارتفاع صفحات روی بستر رسوبات، جریان بیشتری با آنها برخورد کرده و قدرت جریان رو به پایین بیشتر شده و به مراتب رسوب شویی بیشتر می شود.

در دو حالت B:3, 5 و B:3, 10، به علت اینکه تأثیر فاصله میانی بین صفحات و فاصله صفحات تا دریچه تخلیه بیش از تأثیر ارتفاع صفحات روی بستر رسوبات است، با اختلاف بسیار ناچیزی، حجم مخروط رسوب شویی در صفحات با ارتفاع ۱۰ سانتیمتری بیشتر از صفحات با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر است. همان گونه که ذکر شد، بهترین آزمایش آرایش همگرا (مدل A) مربوطه به آزمایش 3, 15, 20 A و بهترین آزمایش آرایش واگرا (مدل B) مربوط به آزمایش 3, 5, 10 B می باشد. با مقایسه شکل های (۵) و (۷) چنین نتیجه گرفته می شود که اختلاف بسیار زیادی در میزان حجم رسوب شویی در این دو آزمایش وجود دارد به گونه ای که حجم رسوب شویی در آزمایش 3, 5, 10 B به میزان ۶۵۸ درصد نسبت به آزمایش 3, 15, 20 A افزایش یافته است.

#### آرایش های ترکیبی (مدل های C تا O)

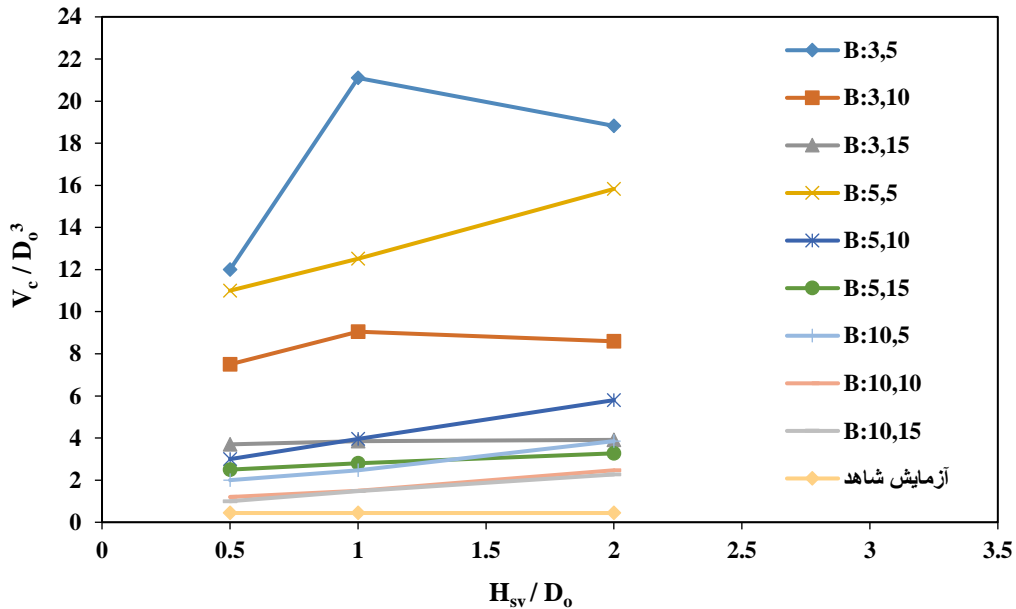
با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت قبل، مشخص شد که آرایش واگرا (مدل B) عملکرد رسوب شویی بهتری نسبت به آرایش همگرا (مدل A) دارد. بنابراین در تمامی آرایش های

در این آرایش، با باز شدن دریچه تخلیه تحتانی، گردابه بسیار عظیمی تشکیل شده و رسوبات با غلظت فراوان از دریچه خارج می شوند. وجود این گردابه ها به این علت است که با قرار گرفتن صفحات در جهت جریان، گرادیان قائم فشار در دو طرف صفحه ایجاد شده و جریان از سمت پرفشار به سمت کم فشار حرکت می کند. جریان ثانویه ایجاد شده به جریان چرخشی تبدیل شده و همین امر باعث ایجاد گردابه های شدید می شود. از طرفی به علت سرعت زیاد آب در جریان خروجی و تنش برشی ایجاد شده ناشی از جریان چرخشی، گردابه ها در نقطه مقابل دریچه تخلیه تجمع پیدا کرده و خارج می شوند. در این حالت رسوب شویی با شدت زیاد از لحظات اولیه آغاز و تا پایان ادامه پیدا می کند. به علت انقباض و انبساطی که در مقطع عبوری جریان از دریچه تخلیه اتفاق می افتد اختلاف فشار زیاد دو طرف صفحه ایجاد شده، تلاطم افزایش پیدا کرده و جریان گردابی اطراف دریچه تقویت شده و رسوبات را از جای خود بلند کرده و رسوب شویی تشدید می شود.

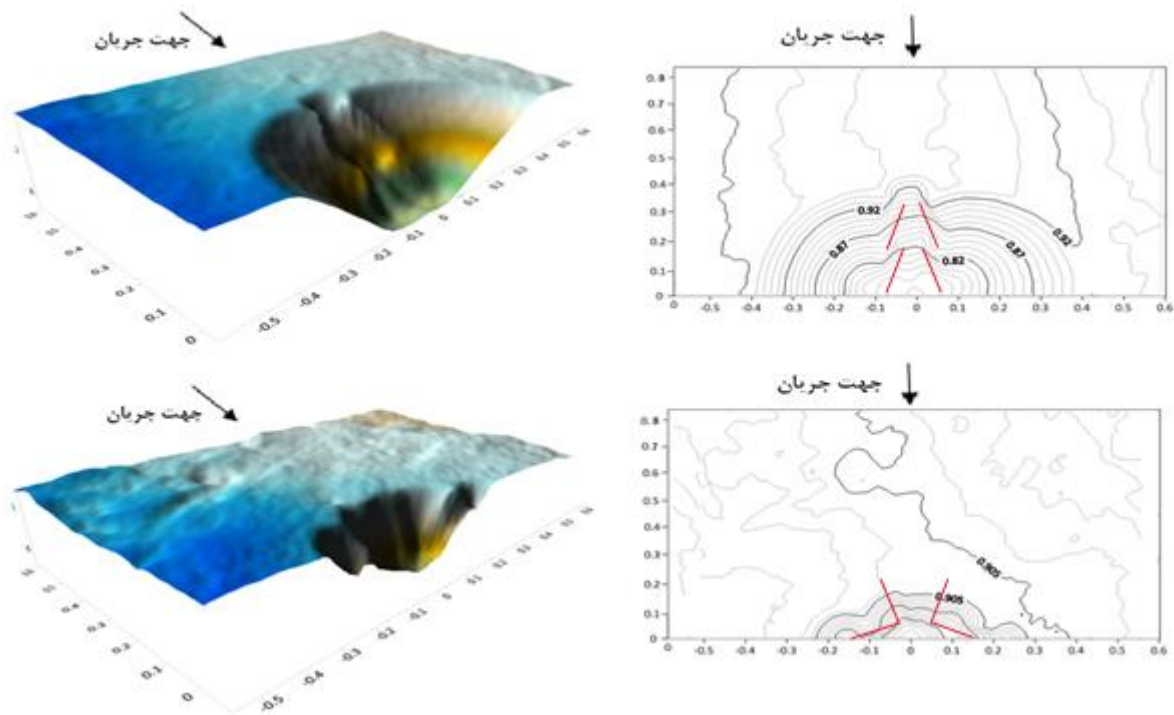
در این آرایش با کاهش فاصله میانی بین صفحات به علت انقباض در محل ورود آب به دریچه تحتانی، تلاطم جریان تشدید شده و همچنین رسوب شویی افزایش می یابد به طوری که در صفحات با فاصله تا خروجی ۳ سانتیمتر و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر با کاهش  $L_{hr}$  از ۱۵ به ۵، حجم چاله رسوب شویی تقریباً ۴۴۸ درصد افزایش می یابد. همچنین با کم شدن فاصله صفحات مستغرق تا دریچه تخلیه، صفحات به جت جریان ورودی به دریچه نزدیک تر شده و فشار دینامیکی زیادی جلوی دریچه ایجاد شده و قدرت گرداب نعل اسبی افزایش می یابد و رسوبات با حرکت چرخشی از کناره های صفحه منتقل شده و رسوب شویی افزایش می یابد. به گونه ای که در صفحات با فاصله میانی ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر با کاهش  $L_v$  از ۱۰ به ۳، حجم چاله رسوب شویی به

آرایش ترکیبی مدل O، دقیقاً با آرایش شعاعی استفاده شده در تحقیق مهتابی و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد. شکل (۸) نمای سه بعدی و توپوگرافی مخروط رسوب شویی در آزمایش‌های مدل C و O را نشان می‌دهد.

ترکیبی، صفحات روبروی درجه تخلیه کننده تحتانی با آرایش واگرا و فواصل به دست آمده کارگذاری شدند. شکل قرارگیری صفحات و ابعاد و اندازه‌ها در جدول (۱) آمده است. این نکته قابل ذکر است که جهت مقایسه این مطالعه با مطالعات قبل،



شکل ۷- تغییرات حجم مخروط رسوب شویی در سناریوهای مختلف آرایش واگرا (مدل B) نسبت به ارتفاع صفحات



شکل ۸- نمای سه بعدی توپوگرافی و نمودار خطوط تراز در آزمایش‌های مدل C و O

شویی اندکی ارتقا می‌یابد به گونه‌ای که حجم مخروط رسوب شویی در آزمایش با آرایش مدل C نسبت به آزمایش B:3, 5, 10 به میزان تقریبی ۷ درصد افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل

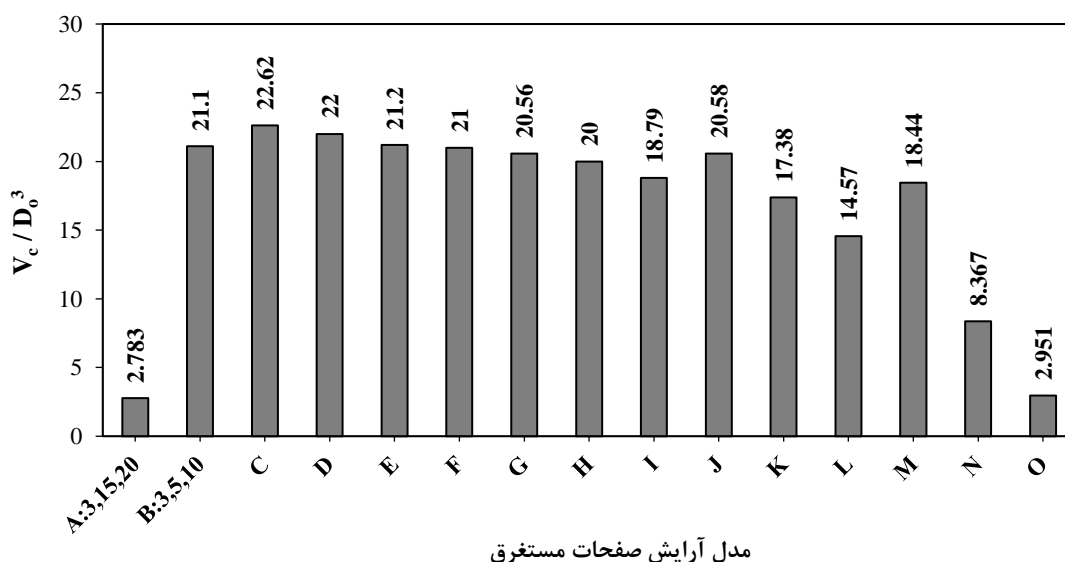
شکل (۹) حجم مخروط رسوب شویی در آرایش‌های مختلف صفحات را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با دو ردیفه و سه ردیفه شدن صفحات واگرا عملکرد رسوب

پایین دست منتقل شده و عملیات رسوب‌شویی به میزان کمی اتفاق می‌دهد. با تحلیل داده‌ها چنین نتیجه گرفته می‌شود که آرایش‌های مدل C و N که به ترتیب بیشترین و کمترین میزان رسوب‌شویی را در بین آرایش‌های ترکیبی دارند نسبت به آرایش مدل O، به ترتیب ۶۶۷ و ۱۸۳ درصد افزایش حجم رسوب‌شویی داشته‌اند.

جهت تعیین میزان تأثیر متغیرهای صفحات مستغرق بر حجم رسوب‌شویی، تغییرات حجم رسوب‌شویی در قالب گروه‌های بدون بعد ارزیابی شده و آنالیز حساسیت پارامترهای متغیر صفحات مستغرق مورد بررسی قرار گرفت. جداول (۴)، (۵) و (۶) درصد تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی نسبت به تغییرات پارامترهای متغیر صفحات مستغرق را نشان می‌دهند.

است که با دو ردیفه شدن صفحات در آرایش واگرا، انقباض و انبساط مضاعفی در مقابل جریان ایجاد می‌شود که این امر موجب تشدید گردابه‌های ایجادشده و در نهایت تشدید رسوب‌شویی می‌شود.

نتایج بدست آمده از این شکل نشان می‌دهد که آرایش شعاعی استفاده‌شده در تحقیقات (Mahtabi *et al.* (2018) (آرایش مدل O)، نسبت به تمامی آرایش‌های استفاده‌شده در این تحقیق (به غیر از آرایش A:3, 15, 20)، حجم رسوب‌شویی به مراتب کمتری دارد. به نظر می‌رسد که در آرایش مدل O، به دلیل شعاعی شدن با افزایش زاویه صفحات پشت دریچه تخلیه‌کننده تحتانی مخزن و همچنین انقباض و انبساط ایجادشده، ناحیه عرضی بیشتری توسط صفحات ایجاد شده و این امر مانعی را برای خروج رسوبات بوجود می‌آورد. بنابراین رسوبات کمتری به



شکل ۹- نمودار حجم بی‌بعد شده مخروط رسوب‌شویی در آرایش‌های مختلف صفحات مستغرق

جدول ۴- تأثیر کاهش فاصله میانی صفحات مستغرق ( $L_{hr}$ ) در تغییرات حجم رسوب‌شویی

مقدار $L_{hr}$ (cm)	حجم رسوب‌شویی ( $cm^3$ )	درصد تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی (%)
۱۵	۲۷۵۵	۳۰.۲
۵	۱۱۰۶۶	

جدول ۵- تأثیر کاهش فاصله صفحات مستغرق تا دریچه تخلیه‌کننده تحتانی ( $L_v$ ) در تغییرات حجم رسوب‌شویی

مقدار $L_v$ (cm)	حجم رسوب‌شویی ( $cm^3$ )	درصد تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی (%)
۱۰	۲۷۲۴	۲۶.۱
۳	۹۸۳۶	

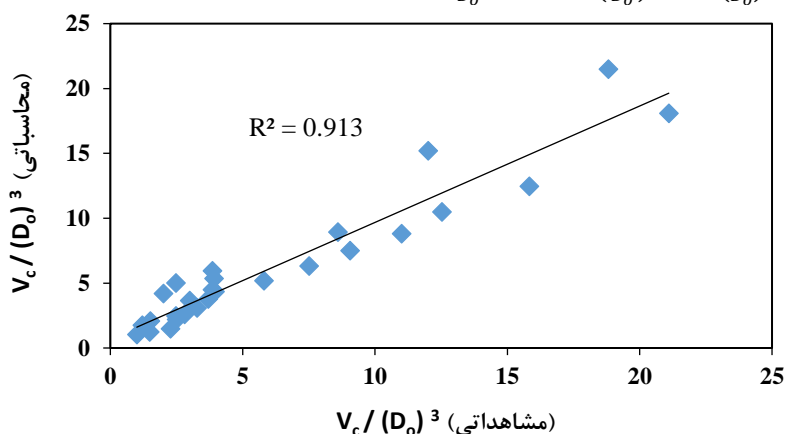
جدول ۶- تأثیر افزایش ارتفاع صفحه مستغرق بالای بستر رسوبات ( $H_{sv}$ ) در تغییرات حجم رسوب‌شویی

مقدار $H_{sv}$ (cm)	حجم رسوب‌شویی ( $cm^3$ )	درصد تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی (%)
۵	۵۰۷۱	۴۲
۲۰	۷۲۰۲	

توان‌های به‌دست‌آمده در این معادله نشان‌دهنده درجه اهمیت پارامترها می‌باشند. همان‌گونه که در این معادله نشان داده شده است بیشترین توان به ترتیب مربوط به پارامترهای  $L_v$ ،  $L_{hr}$  و  $H_{sv}$  می‌باشد (توان منفی به معنی رابطه عکس بین حجم مخروط رسوب‌شویی و پارامتر موردنظر است) که با نتایج جداول (۴) تا (۶) مطابقت دارد.

با آنالیز حساسیت صورت گرفته، بر روی سه پارامتر فاصله میانی صفحات مستغرق ( $L_{hr}$ )، فاصله صفحات مستغرق تا دریچه تخلیه کننده تحتانی ( $L_v$ ) و ارتفاع صفحه مستغرق بالای بستر رسوبات ( $H_{sv}$ ) مشخص می‌شود که در این تحقیق جهت تعیین حجم مخروط رسوب‌شویی، رابطه پیشنهادی نسبت به تغییرات  $L_{hr}$  بیشترین حساسیت را دارد و پارامترهای  $L_v$  و  $H_{sv}$  در اولویت های بعد قرار دارند.

همچنین نمودار حجم بی‌بعد شده رسوب‌شویی در دو حالت مشاهده‌شده از آزمایش‌ها و محاسبه‌شده از معادله (۴) در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود همبستگی خوبی بین دو حالت مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد.



شکل ۱۰- نمودار حجم بی‌بعد شده مخروط رسوب‌شویی در دو حالت مشاهداتی و محاسباتی

آرایش واگرا نسبت به آرایش همگرا، عملکرد بهتری در افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی دارد. همچنین با انجام آزمایش‌های مربوط به آرایش‌های ترکیبی صفحات مستغرق و با مقایسه نتایج با آزمایش‌های قبل، مشخص گردید که استفاده از دو ردیف صفحه در آرایش واگرا، حجم مخروط رسوب‌شویی را نسبت به آزمایش شاهد به میزان ۵۱ برابر افزایش می‌دهد. همچنین در این آرایش

با توجه به جداول (۴) و (۵) مشخص می‌شود که با کاهش فاصله میانی صفحات مستغرق ( $L_{hr}$ ) از ۱۵ به ۵ سانتیمتر، حجم رسوب‌شویی به میزان ۳۰۲ درصد افزایش یافته است، همچنین با کاهش فاصله صفحات مستغرق تا دریچه تخلیه کننده تحتانی ( $L_v$ ) از ۱۰ به ۳ سانتیمتر، حجم رسوب‌شویی به میزان ۲۶۱ درصد افزایش یافته است. این موضوع نشانگر این مطلب است که تغییرات  $L_{hr}$  در تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی از درجه اهمیت بیشتری نسبت به تغییرات  $L_v$  برخوردار است.

در جدول (۶) مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع صفحه مستغرق بالای بستر رسوبات ( $H_{sv}$ ) از ۵ به ۲۰ سانتیمتر، حجم رسوب‌شویی به میزان ۴۲ درصد افزایش می‌یابد که بیانگر این است که اهمیت تغییرات این پارامتر نسبت به دو پارامتر قبل بسیار کمتر می‌باشد.

جهت بررسی تأثیر متغیرهای صفحات مستغرق بر حجم مخروط رسوب‌شویی با استفاده از روش همبستگی چند جمله‌ای و رگرسیون غیرخطی و به کمک نرم‌افزار SPSS، معادله (۴) ارائه می‌گردد.

$$\frac{V_c}{D_o^3} = 2.081 \left(\frac{L_{hr}}{D_o}\right)^{-1.266} \left(\frac{L_v}{D_o}\right)^{-1.067} \left(\frac{H_{sv}}{D_o}\right)^{0.25} \quad (4)$$

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر آرایش‌های مختلف صفحات مستغرق به همراه متغیرهای مربوط به آن‌ها، جهت افزایش میزان رسوبات تخلیه‌شده از مخازن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از سه سری آزمایش با آرایش‌های همگرا، واگرا و ترکیبی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از صفحات مستغرق در

خروجی مخزن، رسوبات بیشتری از مخزن خارج شده و حجم چاله رسوب‌شویی افزایش می‌یابد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

هرچه فاصله میانی بین صفحات و فاصله صفحات تا خروجی کمتر می‌شود عملکرد فلاشینگ افزایش می‌یابد، به‌علاوه با در نظر گرفتن ارتفاع صفحات مستغرق روی بستر رسوبات برابر با قطر

## REFERENCES

- Abdipor, A., Ahmadi, H. and Shamsai, A. (2016). Investigation and evaluation of the effects of jet on the pressure flushing in hydropower reservoirs. *Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, 2 (7), 35-45. (In Farsi)
- Abdollahpour, M. and Hossein zadeh dalir, A. (2013). Effect of Semi-Cylinder Structure Position on Pressurized Flushing Efficiency of Reservoirs. *Water and soil science journal, University of Tabriz*, 23(2), 269-282. (In Farsi)
- Abdollahpour, M. and Hossein zadeh dalir, A. (2016). Application of pile and submerged vanes to remove sediments from dam reservoirs in pressurized flushing. *Iranian water research journal*, 9(19), 165-169. (In Farsi)
- Ahadpour Dodaran, A. Park, S.K. Mardashti, A. and Noshadi, M. (2012). Investigation of dimension changes in 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), 71-81.
- Jalili, H. and Hossein zadeh dalir, A. (2012). Extend the vortex flow around the reservoirs sluice gate. *Proceedings of the First International Conference on Dams and Hydropower, Tehran, IRAN*, 1-13. (In Farsi)
- Jenzer Althaus, J. M. I., Cesare, G. D. and Schleiss, A. J. (2015). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by Jet-Induced flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014078.
- Madadi, M.R., Rahimpour, M. and Qaderi, K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 180-189.
- Madadi, M.R., Rahimpour, M. & Qaderi, K. (2017). Improving the Pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study. *Water Resources Management*, 31(14), 4633-4647.
- Mahtabi, G.H., Karimi, S. and Mohamadioun, M. (2018). Effect of the number of rows, height and arrangement of submerged vanes in flushing of dam reservoir. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 285-296. (In Farsi)
- Melville, B.W. (1997). Pier and abutment scour-an integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 123(2), 125-136.
- Mohammadi, M., Salmasi, F., Hossein zadeh dalir, A. and Arvanaghi, H. (2014). Experimental Investigation of the effect of a Semi-Cylindrical structure on increasing pressurized sediment flushing capacity in reservoirs of dams. *Water and soil science journal, University of Tabriz*, 24(2), 21-30. (In Farsi)
- Morris, G. L. and Fan, J. (2009). *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*; New York, McGraw Hill, Electronic Version, pp: 784.
- Odgaard, A. J. and Kennedy, J.F. (1983). River-Bend Bank Protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(8), 1161-1173.
- Odgaard, A. J. and Wang, Y. (1991). Sediment management with submerged vanes, I: Theory. *Hydraul. Eng. ASCE*, 117(3), 267-283.
- Odgaard, A. J. (2017). River Management with Submerged Vanes. *River System Analysis and Management*, pp 251-261.
- Ouyang, H. and Lai, J. (2006). Interaction between submerged vanes and its effects on transverse bed profile in river bend. *The seventh international conference on hydro science and engineering, Philadelphia, USA*, 10-13.
- Shafai Bajestan, M., Khademi, Kh. and Khozaymehnezhad, H. (2015). Submerged vane-attached to the abutment as scour countermeasure. *Ain Shams Engineering Journal*, 6, 775-783.
- Tigrek, S. and Aras, T. (2011). Reservoir Sediment Management. *Taylor & Francis*.
- Soon-Keat, T., Guoliang, Y., Siow-Yong, L. and Muk-Chen. (2005). Flow structure and sediment motion around submerged vanes in open channel. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 131(3), 132-136.
- Tafarojnoruz, A., Gaudio, R. and Calomino, F. (2012). Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 138, 297-305.
- Tigrek, S. and Aras, T. (2011). Reservoir Sediment Management. *Taylor & Francis*.
- Turkben, B. (2018). Experimental Study of Submerged Vanes in Intakes under Sediment Feeding Conditions. *E3S Web of Conferences*, 40, 03016, *River Flow*.
- White, R. (2000). Flushing of Sediments from Reservoirs, ICOLD. *World Register of Large Dams, HR Wallingford, UK*.