

# **EXTENDED ABSTRACT**

# A Numerical Study on the Impact of Geometric and Hydraulic Parameters on Hydraulic Sedimentation in Storage Dam Reservoirs

Yousef Hassanzadeh<sup>a,\*</sup>, Nazila Kardan<sup>b</sup>, Mostafa Roshdi<sup>c</sup>, Mehdi Komasi<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Water Engineering, Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran and Farazab Consulting Engineers Co, PMO, Tabriz, Iran

<sup>b</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

<sup>c</sup> Graduated MSc Student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

<sup>d</sup> Department of Civil Engineering, University of Ayatollah Ozma Boroujerdi, Boroujerd, Iran

Received: 07 June 2022; Reviewed: 27 June 2023; Accepted: 09 July 2023

#### Keywords:

Hydraulic flushing of sediments under pressure, Descaling cone, Storage dams, Flow-3D software.

## 1. Introduction

Given the significant rate of sediment accumulation in reservoirs and the urgent requirement for additional storage space due to the impracticability of constructing new reservoirs, multiple methods have been explored and implemented to assess sediment deposition, regulate sediment inflow, and facilitate sediment flushing while considering their downstream implications. Hydraulic sediment removal is a highly efficient method for recovering occupied reservoir volume without incurring exorbitant costs linked to mechanical sediment removal methods, thereby achieving enhanced operational efficiency. In this approach, erodible sediments accumulated within the reservoir are targeted for removal by opening deep gates, thereby inducing erosion and facilitating the extraction of a portion of the sediment. This can be accomplished through two approaches: under pressure, where the reservoir water level remains unaffected, and by decreasing the reservoir water level to align with that of the river.

The aim of this study is to investigate the influence of variations in hydraulic and geometric parameters of reservoirs and sediment on sediment discharge and the subsequent release of free storage volume during pressurized flushing operations in dams. Additionally, the study examines the uniformity of sediment particles across different levels of sediment accumulation in the reservoir and evaluates the non-uniformity effect of particle size distribution when equal proportions of particles with varying diameters are present in cases related to uniform grading at different sediment accumulation levels. Furthermore, the study explores the impact of the number of active gates during operation on the volume and geometry of the scour hole resulting from flushing operations and the relative percentage of sediment discharged from the reservoir.

- This study investigates the impact of the average particle diameter of accumulated sediment in the reservoir on the geometry and volume of the scour cone under conditions of uniform particle grading.
- This study investigates the influence of a non-uniform particle size distribution of settled sediment within the reservoir, while maintaining an equal proportion of particles with the average diameter as in the case of uniform grading, on the geometry and volume of the scour cone, in comparison to uniform particle grading.

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz https://doi.org/10.22034/CEEJ.2023.51982.2154 \* Oraid Cod Corresponding Author: 0000.0002.4272.4467



Online ISSN: 2717-4077

\* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0003-4272-4667 *E-mail addresses:* yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir (Yousef Hassanzadeh), n.kardan@azaruniv.ac.ir (Nazila Kardan),

m.roshdi97@tabrizu.ac.ir (Mostafa Roshdi), komasi@abru.ac.ir (Mehdi Komasi).

- This study investigates the impact of the sedimentation level in the reservoir on the geometry and volume of the scour cone.
- This study investigates the influence of the number of sub-flushing outlets on the geometry and volume of the scour cone.

Given that the primary goal of sediment removal from reservoirs is to restore the maximum lost storage volume resulting from sediment accumulation, the main objective of this study is to determine the optimal value for each parameter. This value should result in the highest discharge of accumulated sediment from the reservoir. It is evident that the success of the project is directly linked to the amount of sediment directed out of the dam reservoir.

#### 2. Methodology

#### 2.1. Flow-3D

FLOW-3D is a powerful software tool in the field of fluid dynamics, developed and supported by Flow Science, Inc. It is highly regarded for its ability to simulate three-dimensional flow fields, making it widely applicable in scientific research and various industries. The software employs a mesh consisting of rectangular cubic cells in Cartesian and cylindrical coordinate systems for conducting simulations. It effectively solves governing equations, including continuity equations, Navier-Stokes equations, and sediment transport equations, while utilizing five turbulence models. The utilization of rectangular cubic cells in FLOW-3D simulations offers several advantages, such as reduced memory consumption, ease of geometry generation, and the ability to employ FAVOR and VOF methods for analyzing both solid geometry and the free surface of the fluid.

#### 2.2. Verification

To validate the software, benchmark values from laboratory experiments conducted by Fathi-Moghadam et al. (2010) were employed. These experiments were conducted in the hydraulic laboratory of Ahvaz University, utilizing a flume with dimensions of 3.2 meters in length, 1.5 meters in width, and 4 meters in height. The objective was to simulate pressurized flushing and determine the parameters influencing the volume and length of the scour cone resulting from hydraulic sediment removal.

In the experimental setup, the first meter of the flume was dedicated to providing a consistent inflow towards the accumulated sediment in the reservoir, which had a deposition level of 0.42 meters from the reservoir floor. Once the desired reservoir level was achieved, a 2-inch diameter outlet valve was opened to initiate the main part of the experiment, involving pressurized hydraulic sediment removal. The outflow, consisting of water and sediment, was directed into a sediment settling basin in the first section. The dimensions of this settling basin were 3.5 meters in length, 0.1 meters in width, and 0.8 meters in height. The outflow rate was measured using a V-shaped weir. To maintain continuous water circulation within the system, a pump and suction equipment were utilized. The sediments used in the experiments were non-cohesive, with a density of 2650 kilograms per cubic meter. Three different sizes of sediment particles were tested, with average diameters of 0.27mm (fine grain), 0.42mm (medium grain), and 1.01 mm (coarse grain). The experimental model is illustrated in Fig. 1.



Fig. 1. Laboratory model of pressurized hydraulic sediment removal (Fathi-Moghadam et al., 2010)

The numerical solution derived from the utilization of the FLOW-3D software was compared to the turbulent k- $\epsilon$  model as well as three different sediment transport equations: Meyer-Peter, Nielsen, and Van Rijn. The results of this comparative analysis were carefully examined and documented in Table 1.

		eeedi ized haerning e	ienng manner rear enn	
sediment transport equation	L (m)	Percentage Error L	V (m³/s)	Percentage error V
Meyer - Peter	0.500	3.8	0.0396	8.0
Nielsen	0.501	3.7	0.0397	7.7
Van Rijn	0.543	4.4	0.0470	9.3

|--|

The analysis considered three sediment transport equations. The Nielsen equation caused significant delays and complexity after a certain simulation period. The Van Rijn equation led to premature termination due to small time steps in the early stages. To overcome these challenges, shorter simulation duration and more simulation steps were used, increasing the computational workload and memory usage. As a result, the Meyer-Peter sediment transport equation was chosen as the primary numerical model for the study.

#### 3. Results and discussion

To determine the length, a selection of images depicting the two-dimensional output of accumulated sediment fractions on the baffle plate in the longitudinal half-section of the reservoir were obtained, as illustrated in Fig. 2. Furthermore, Fig. 7 showcases the corresponding section on the upstream wall of the dam. The three-dimensional geometry of the sediment removal cavity was estimated using the Surfer software, as depicted in Fig. 2.



Fig. 2. The 2D and 3D images of the maximum width of the sediment removal cavity after analyzing the models

#### 3.1. impact of sediment accumulation level on the volume of the sediment removal cone

Based on the analysis of sediment removal in reservoirs, regardless of sediment grading, the sediment removal cavity's dimensions and volume increase with higher sediment accumulation levels. The width of the cone is generally greater than its length. Non-uniform sediment grading shows similarities to medium-grained sediment conditions, particularly at an accumulation level of 0.25 meters. In terms of sediment removal, higher sediment levels in the reservoir result in a greater relative amount being removed, except for fine-grained sediments where the maximum removal occurs at an accumulation level of 0.03 meters. The highest percentage of reservoir volume restoration is achieved for fine-grained sediments at a level of 0.35 meters.

#### 3.2. The impact of the average diameter size of sediment on the volume of the sediment removal cone

The size of sediment particles, particularly the average diameter, plays a significant role in shaping the sediment removal cone. Increasing the average diameter results in a decrease in the dimensions and volume of the removal cavity, as well as a reduction in restored reservoir volume and the percentage of sediment removed. The width of the removal cavity consistently exceeds its length in all models studied. For fine-grained sediments, the maximum reservoir volume restoration occurs at an accumulation level of 0.35 meters, while the highest relative percentage of sediment exiting the reservoir is observed at an accumulation level of 0.30 meters. Fig. 3 shows the results.



Fig. 3. The effect of sediment particle diameter on the length and on the volume of the sediment removal cone

#### 4. Conclusions

This study aimed to investigate the impact of various factors on the sediment removal cone resulting from hydraulic flushing. Factors such as sediment accumulation level, particle diameter, distribution uniformity, and the number of active bottom outlets were considered. By simulating 18 models using FLOW-3D software and analyzing the results graphically, the optimal conditions for maximizing sediment removal were identified. The study validated the pressure flushing through simulation and presented key findings.

The size and volume of the sediment removal cone increase as sediment accumulation levels in the reservoir rise. Conversely, they decrease with larger average particle diameters. When comparing non-uniform particle size distributions with uniform distributions at various accumulation levels, the results closely align with those of uniform distributions. Increasing the number of bottom outlets increases the size and volume of the sediment removal cone. However, the rate of sediment removal increase is less significant for configurations with two or three outlets at lower levels. Therefore, a two-bottom-outlet configuration is recommended for lower levels to minimize water loss and environmental impact. The width of the sediment removal cone consistently exceeds its length in all models analyzed. Among the analyzed models, one particular model stood out, utilizing three simultaneous bottom outlets, a sediment accumulation level of 0.35 m, and a uniform particle size distribution of 0.042mm. This model achieved the highest sediment removal (78690m<sup>3</sup>), restored the greatest percentage of reservoir volume (11.24%), and exhibited the highest relative sediment discharge (16.06%). To ensure successful pressure flushing operations, it is recommended to maintain a constant discharge rate, position the bottom outlets equally, and conduct the operation in a reservoir with smaller sediment diameter, higher accumulation level, and more active bottom outlets. However, it is important to note that these findings are specific to the current simulation and further research is needed for generalization to other models.



# بررسی عددی تأثیر تغییر در پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مخزن و رسوبات بر میزان رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار مخازن سدهای ذخیرهای

 $^{4}$ یوسف حسنزاده $^{1^{*}}$ ، نازیلا کاردان $^{2^{*}}$ ، مصطفی رشدی $^{8^{*}}$ ، مهدی کماسی

<sup>1</sup> استاد گروه مهندسی عمران- آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز <sup>1</sup> شرکت مهندسین مشاور فراز آب، دفتر برنامهریزی و مدیریت طرح و پروژهها، تبریز <sup>2</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز <sup>3</sup> دانشآموخته مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و سازههای هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز <sup>4</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیتالله العضمی بروجردی، بروجرد

دريافت: 1401/3/17، بازنگرى: 1402/4/16، پذيرش: 1402/4/18، نشر آنلاين: 1402/4/18

#### چکیدہ

عملیات رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار بهعنوان یکی از مهمترین روشهای مبارزه با رسوب مخازن سدها متأثر از عوامل و متغیرهای متعدد سد و مخزن میباشد که جهت حصول بهترین نتیجه ممکن از انجام عملیات مطالعه و بررسی آنها الزامی میباشد. در تحقیق حاضر بهروش عددی سهبعدی با استفاده از نرمافزار 3D -FLOW، تأثیر تغییر در تراز رسوبات انباشته شده در مخزن، اندازه قطر متوسط رسوبات، یکنواختی و غیریکنواختی داندبندی رسوبات انباشته شده و نیز تعداد کارکرد همزمان دریچههای عمقی در زمان عملیات فلاشینگ تحتفشار بهعنوان پارامترهای سد و رسوبات بر هندسه و حجم مخروط رسوبشویی شبیهسازی گردید. نتایج حاصل شده بیانگر آن بود که در تراز آب مخزن ثابت و نیز دبی خروجی ثابت از هر دریچه عمقی، ابعاد و حجم مخروط رسوبشویی شبیهسازی گردید. نتایج حاصل شده بیانگر آن بود که در تراز آب مخزن ثابت و نیز دبی خروجی ثابت از هر دریچه عمقی، ابعاد و حجم مخروط رسوبزدایی با افزایش تراز رسوبات، افزایش تعداد دریچهها و کاهش قطر رسوبات، افزایش مییابد؛ بهطوری که جهت احیای هر چه بیشتر حجم از بین رفته مخزن در اثر رسوبگذاری بهتر است عملیات رسوبزدایی تحتفشار در حالت حداکثر تراز انباشت رسوبات با قطر کمتر و کرد و ههرزمان حداکثر تعداد دریچههای تعاین سوبزدایی سوبزدای هر و کاهش و در حالت حداکثر تراز انباشت رسوبات با قطر کمتر و کرکرد

**کلیدواژهها:** رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار، مخروط رسوبزدایی، Flow-3D، سدهای ذخیرهای.

#### 1– مقدمه

با توجه به نرخ بالای اشغال حجم ذخیره مفید سالانه در سدها و احتیاج فوری به فضای ذخیره سازی آب و عدم امکان احداث سدهای جدید جایگزین به دلیل محدودیت در زمان، بودجه و منطقه مناسب ساخت سد، تحقیق و به کارگیری روشهای متعدد برآورد و نحوه رسوبگذاری در مخازن، کنترل رسوبات وارد شده به مخزن و رسوب شویی مخازن توأم با در نظرگیری تأثیرات آن بر پاییندست اجتنابناپذیر خواهد بود که نیل بدین امر، پژوهش -های زیادی در جهت مرتفع نمودن این مشکلات انجام گرفته است. رسوبزدایی هیدرولیکی روشی مؤثر در بازیابی حجم اشغال شده

مخزن بدون تحمل هزینههای گزاف استفاده از روشهای مکانیکی رسوبزدایی و بازدهی بیشتر میباشد که در آن با باز نمودن دریچههای عمقی جهت ایجاد فرسایش رسوبات قابل فرسایش انباشتهشده داخل مخزن حذف قسمتی از رسوبات از مخزن انجام میگیرد که به دو روش تحت فشار، عدم کاهش تراز آب مخزن، و کاهش تراز آب مخزن تا سطح تراز رودخانه، قابل اجرا میباشد. در روش رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار که موضوع مورد بحث این تحقیق میباشد، حین انجام عملیات، تراز آب داخل مخزن بالاتر از تراز قرارگیری دریچههای عمقی میماند؛ بههمین دلیل به رسوبزدایی هیدرولیکی موسوم است. در این روش با باز شدن

> ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 4077-2717 \* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 09143118303

## 

https://doi.org/10.22034/CEEJ.2023.51982.2154

\* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0003-4272-4667

آدرس ایمیل: yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir (ی. حسنزاده)، n.kardan@azaruniv.ac.ir (ن. کاردان)، m.roshdi97@tabrizu.ac.ir (م. رشدی)، komasi@abru.ac.ir (م. کماسی)،

ناگهانی دریچههای تحتانی سد، عملیات بهرهبرداری از این روش آغاز می گردد؛ به گونه ای که جریان رسوبی در حال خروج از دریچههای زیرین، با تولید یک نیروی فرساینده رسوبات انباشته در مخزن سد را تخلیه می کند که بعد از گذشت مدتی از شروع عملیات، حفرهای مخروطی شکل مقابل دریچه عمقی بهوجود آمده و تا موقع به تعادل رسيدن مخروط كه به تراز آب درون مخزن، دبی جریان خروجی و نوع رسوبات انباشته شده بستگی دارد، توسعه می یابد. شکل (1) نشانگر نمای کلی چاله فرسایشی قیفی شکل تشکیل شده در بالادست سد میباشد. مطابق شکل (1) شیب حفره بهوجود آمده در محور رودخانه، از شیب عرضی آن بیشتر میباشد؛ همچنین مقدار این شیب در رسوبات چسبنده بسیار بیشتر از رسوبات غیرچسبنده است. مطالعات انجام شده در تعدادی از سدهای چین نشان داده است که شیب در راستای a بین چهار درصد تا یازده درصد و در راستای b بین نه تا پانزده درصد متغیر می باشد. در رسوب زدایی تحت فشار معمولاً حجم کمی از رسوبات از مخزن خارج می گردند و اثر این روش در دفع رسوبات موضعی میباشد. معمولاً در ابتدای عمل رسوبزدایی، رسوبات بهصورت خمیری، و بعد مخلوطی از رسوب و آب و درنهایت آب زلال خارج می شود (وزارت نیرو، 1391).



شکل **1-** حفره فرسایش یافته در بالادست سد در اثر رسوبزدایی تحتفشار

با توجه به اهمیت قابل توجه موضوع رسوبزدایی هیدرولیکی از مخازن سدها در احیای قسمت قابل توجهی از حجم از دست-رفته مخازن سدها بر اثر انباشت رسوبات و قابل استفاده شدن آن، عملیات مذکور و عوامل تأثیرگذار بر انواع مشخصههای هیدرولیکی و هندسی و نیز راندمان آن توسط بسیاری از محققان مهندسی آب، به انواع روشهای آزمایشگاهی و عددی در دهههای اخیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره شده است.

Fan و Morris (1992) روشهای هیدرولیکی استفاده شده جهت رسوبزدایی مخازن سدها و ایجاد ظرفیت ذخیره بلندمدت در کشور چین، شامل هدایت رسوبات به بیرون مخزن در زمان سیلاب، انجام عملیات رسوبزدایی در موقع سیلاب، رسوبزدایی

توأم با تخلیه آب مخزن و تخلیه جریان غلیظ را مورد بررسی قرار دادند. آنها روش عددی جهت محاسبه فرسایش رسوبات پس رونده در طی پایین آوردن آب مخزن و روش تقریبی جهت برآورد مقدار رسوبات تخلیه شده از مخزن در طی رسوبزدایی بهروش تخلیه جریان غلیظ را ارائه و در روشهای ارائه شده مقادیر محاسبه شده را با دادههای میدانی مقایسه نمودند.

Hassanzadeh (1995) عملیات رسوبزدایی در مخزن سد سفید رود را در وضعیت فلاشینگ آزاد بررسی نمود و دریافت در این سد که در سال 1961 احداث شده و تا سال 1981، بالغ بر 800 میلیون مترمکعب از ظرفیت ذخیره آن در اثر انباشت رسوبات از بین رفته بود، در طی 8 سال عملیات رسوبزدایی با پایین آوردن تراز آب مخزن تا تراز رودخانه، حدود 300 میلیون مترمکعب از رسوبات انباشته شده با عبور از 5 دریچه عمقی تعبیه شده در سد به بیرون سد هدایت شده و قسمتی از ظرفیت ذخیره از بین رفته سد در اثر انباشت رسوبات آزاد شد.

Wen Shen (1999) با مرور و جمع بندی روش های موجود فلاشینگ رسوبات از مخازن سدها و با تکیه بر لزوم متحدسازی آنالیز ریسک جهت برنامه ریزی های عملیات رسوب زدایی از مخزن سدها به نتایج زیر دست یافت؛ رسوب زدایی در وضعیت پایین آوردن آب مخزن به عنوان روشی کم کارآمد جهت رسوب شویی از مخازن سدها می باشد.

Olsen (1999) روند رسوبزدایی در مخازن آب را بهصورت مدل عددی دوبعدی مورد بررسی قرار داد. وی با مقایسه نتایج مدل عددی و مدل فیزیکی نتیجه گرفت ویژگیهای اصلی الگوی فرسایش در مدل عددی منعکس شده و اختلاف بین حجم آبشستگی اندازهگیری شده و محاسبه شده مقدار کمی بود که بیان گر معقول بودن سادهسازیهای انجام شده در مدل عددی بود. با در نظر گرفتن نامعلوم بودن فرمولهای انتقال رسوب، اختلاف محاسبه شده به نظر معقول میآمد.

Liu و همکاران (2004) مدل عددی یک بعدی پیش بینی مقادیر رسوبات شسته شده و نهشته شده در مخازن، سیر تکاملی تغییرات بستر و تغییرات انباشت جامدات معلق در طی رسوبزدایی را بر روی مخازن سدهای Dashidaira و Unazuki که روی رودخانه Kurobe در کشور ژاپن احداث شدهاند را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج محاسبات تطابق خوبی با مقادیر اندازه گرفته شده داشت.

و همکاران (2006) با مطالعه فیزیکی ارزیابی رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار از مخازن دریافتند مقدار رسوبات شسته شده با کاهش عمق آب مخزن افزایش و با افزایش دبی خروجی از دریچه تحتانی افزایش مییابد. همچنین طبق نتایج آنها جهت بیشینهسازی تأثیر رسوبزدایی تحتفشار،

عملیات رسوبزدایی باید در کمترین تراز ممکن آب مخزن انجام گیرد و یا زمان عملیات رسوبزدایی باید با وضعیت کمترین تراز آب عملیاتی در مخزن بهطوریکه دریچههای تحتانی بهصورت تمام ظرفیت بهکارگرفته میشوند، مرتبط گردد.

و همکاران (2009) بهروش عددی رسوب-زدایی به روشهای تحتفشار و آزاد را در مخزن سد دز با استفاده از روش مورد بررسی و مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند با افزایش گرادیان تراز آب و دبی جریان خروجی میزان رسوبات شسته شده از مخزن سد نیز افزایش مییابد؛ ولی طبق نتایج حاصل شده دریافتند روش فلاشینگ قادر به مرتفع نمودن مشکل رسوب-گذاری در مخزن سد دز نمی باشد.

Fathi-Moghadam و همکاران (2010) با مطالعه فیزیکی رسوبزدایی تحتفشار جهت خروج رسوبات از نوع غیرچسبنده از مخزن سد با اعماق و دبیهای مختلف جهت تعیین هندسه مخروط آبشستگی ناشی از رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار برای رسوبات ریزدانه، درشت دانه و رسوبات با اندازه متوسط که از نوع غیرچسبنده بودند، مشاهده نمودند میزان رسوبزدایی با افزایش دبی خروجی و کاهش اندازه ذرات و نیز کاهش عمق افزایش دبی خروجی و کاهش اندازه ذرات و نیز کاهش عمق ردایی هیدرولیکی و طول آن ارائه نمودند. همچنین ایشان زدایی هیدرولیکی و طول آن ارائه نمودند. همچنین ایشان در مجرای خروجی رسوبات و توسعه اولیه مخروط رسوبزدایی بوده و سرعت رسوبات در مجرا مهمترین پارامتر مؤثر در تعیین اندازه تعادل نهایی مخروط آبشستگی است.

I و همکاران (2011) با بررسی فلاشینگ سد NREB احداث شده بر روی رودخانه Nakdong، بر اساس منحنیهای فلاشینگ رسوب و مدلسازی جریان شبه آرام تحقیقاتی انجام داده و نتایج را بهصورت منحنیهای رسوبزدایی که حجم رسوبات شسته شده شده را در یک دبی خروجی یکنواخت و عمق جریان مشخص وصف میکنند، ارائه نمودند.

و همکاران (2012) بهروش آزمایشگاهی تأثیر استفاده از ویبراتورهای جاسازی شده در لایههای رسوب بر ابعاد مخروط حاصل از رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار را بررسی نمودند. آنها تأثیر ویبراتورها بر ابعاد مخروط در انواع حالتهای 2 مقدار اندازه قطر دریچه عمقی و 5 دبی خروجی از دریچه عمقی سد بهازای تراز ثابت عمق آب مخزن را بررسی نموده و دریافتند استفاده از ویبراتور، بهشدت بر ابعاد مخروط رسوبشویی تأثیر گذار است. آنها همچنین در وضعیت

جریان آب زلال، معادلات بیبعدی را جهت پیشبینی مشخصههای مخروط رسوبشویی ارائه نمودند.

Haun و Olsen (2012) بهروش عددی سهبعدی، رسوبزدایی رسوبات از مخزن سد آنگوسترا<sup>1</sup> واقع در کاستاریکا را در برابر داده-های حاصل از اندازه گیریهای میدانی بررسی نمودند. برنامه عددی نوشته شده، معادلات ناویر استوکس<sup>2</sup> متوسط گیری شده زمانی (RANS) را بهروش حجم محدود حل مینمود. نتایج خروجی حاصل از شبیهسازی شامل تغییرات بستر در طی عملیات رسوبزدایی و حجم رسوبات خروجی از مخزن بود که در توافق قابل قبولی با دادههای ناشی از اندازه گیریهای میدانی بود؛ هرچند اختلافاتی بین توسعه کانال رسوبشویی محاسبه شده در مدل عددی و کانال حاصل شده در پروتوتیب دارای اختلافاتی بودند.

Ahn و همکاران (2013) از بین روشهای متعدد مدیریت رسوب رسوبزدایی بهروش پایین آوردن سطح آب مخزن (رسوب-زدایی آزاد) را بهعنوان یک روش مدیریت قابل اجرا توصیه نمودند. آنها همچنین با استفاده از یک مدل عددی رسوبگذاری و فلاشینگ مخزن را مورد بررسی و مطالعه قرار داده و نتایج حاصل شده با استفاده از دادههای اندازه گیری شده از سال 1975 تا 1995 را کالیبره نمودند. مشاهدات حاکی از آن بود نتایج شبیه-سازی با جریانهای شبهآرام و آشفته مشابه هستند. آنها همچنین دریافتند با کاهش تراز آب در طول فلاشینگ و افزایش دبی خروجی از مخزن، رسوبات بیشتری از مخزن به بیرون هدایت می گردد ولی کارایی فلاشینگ کاهش می یابد.

Emamgholizadeh و Fathi-Moghdam (2014) با مطالعه آزمایشگاهی رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار با رسوبات چسبنده در مخزن سدهای بزرگ، مشاهده نمودند حجم رسوبات شسته شده با افزایش دبی خروجی و کاهش تراز آب مخزن و نیز کاهش دانسیته رسوبات، افزایش مییابد. همچنین دریافتند درحالیکه عمق آب روی رسوبات مهمترین پارامتر در ریزش رسوبات در بالای دریچه تحتانی و توسعه اولیه مخروط آبشستگی بود، آنالیزهای حساسیت حاکی از آن بود که دانسیته رسوبات چسبنده مؤثرترین پارامتر در تعیین اندازه نهایی مخروط آبشستگی بود.

Althaus و همکاران (2014) مدل آزمایشگاهی تخلیهرسوب از مخازن از طریق دریچههای سد به کمک جریان گردابی ساختگی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با معلق نگهداشتن رسوبات توسط جریان جت گردابی شکل ایجاد شده بهوسیله جتهای دایرهای زمینه خروج رسوبات معلق از طریق دریچه سد را مهیا ساخته و با توجه به نتایج آزمایشها مشاهده نمودند خروجی جریان گلآلود (رسوبات) در حالت استفاده از جتهای دایرهای، 1/5 الی 2 برابر

نسبت به وضعیت بدون استفاده از جتهای دایرهای افزایش می-یابد.

Castillo و همکاران (2015) جهت بررسی رسوب گذاری و فلاشینگ 4 روش تکمیلی فرمولهای تجربی و روشهای یک بعدی جهت محاسبه رسوب گذاری در مخزن، شبیه سازی های دو بعدی آنالیز یک فلاشینگ 72 ساعته در مخزن و مدل سهبعدی جزئیات انتقال رسوب از بین دریچه های عمقی سد مطالعه نمودند. آنها همچنین تأثیر افزایش زبری در دریچه های عمقی ناشی از انتقال رسوبات را مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. نتایج بررسی بیانگر آن بود که افزایش زبری در مجراها باعث کاهش میزان انتقال رسوب از مخزن به بیرون می گردد. همچنین با بررسی موضوع دریافتند زمانی در حدود 24 ساعت در حلهای عددی الاتقال و 30 -FLOW نیز زمانی بیش تر از 2001 ساعت جهت شبیه -سازی یک فلاشینگ 72 ساعتی مورد نیاز است. همچنین اثر چسبندگی در افزایش تنش برشی با انجام یک عملیات رسوبزدایی در هر 4 ماه قابل صرف نظر خواهد بود.

Esmaeili و همکاران (2017) مدل عددی سه بعدی فلاشینگ جریان آزاد جهت افزایش کارآمدی عملیات فلاشینگ در مخزن سد Dashidaira، که بر روی رودخانه Kurobe در کشور ژاپن احداث شده است، مورد بررسی قرار دادند. آنها ابتدا با استفاده از شده از مخزن سد، فلاشینگ آزاد را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند و بعد جهت بهتر نمودن تأثیر فلاشینگ تأثیر تغییر دبی قرار دادند و بعد جهت بهتر نمودن تأثیر فلاشینگ تأثیر تغییر دبی مبتنی بر روش حجم محدود را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج اخذ شده نشانگر این بود که افزایش متوسط دبی جریان آزاد در طی فلاشینگ آزاد تا حدود 65 درصد و در وضعیت ضربان دبی چندتایی میتواند تأثیر فلاشینگ را تا 13 درصد و احداث کانال فلاشینش رسوب موضعی از این ناحیه گردد.

kamble و همکاران (2017) به روش آزمایشگاهی در فلوم به طول 9 متر، عرض 0/9 متر و ارتفاع 1/2 متر تأثیر تغییر در دبی جریان خروجی، اندازه دریچه عمقی و عمق آب مخزن را بر پارامترهای هندسی مخروط رسوبشویی در عملیات رسوبزدایی تحتفشار را بررسی نمودند. نتایج حاصل شده حاکی از آن بود ابعاد مخروط حاصل از فلاشینگ با افزایش اندازه دریچه تحتانی و دبی خروجی از دریچه تحتانی و نیز کاهش تراز آب مخزن افزایش مییابد. آنها همچنین با استفاده از آنالیز ابعادی نسبت به شناسایی پارامترهای بدون بعد تأثیرگذار بر طول و عمق مخروط شناسایی مبادرت نموده و در انتها به کمک رگرسیون غیرخطی چند گانه روابط تجربی جهت محاسبه طول و عمق بدون بعد مخروط رسوبشویی ارائه نمودند.

Madadi و همکاران (2017) با مطالعه آزمایشگاهی روشهای ارتقای اثر رسوبزدایی تحتفشار با بهکارگیری سازه نیمدایرهای در بالادست دریچه تحتانی در مخازن مشاهده کردند قطر سازه نیمدایرهای نقش مهمی در مشخصههای هندسی مخروط آبشستگی ایفا میکند؛ بهطوریکه اثر رسوبزدایی در وضعیت استفاده از سازه نیم دایرهای در دریچه تحتانی نسبت به رسوب-زدایی از دریچه معمولی به طور چشمگیر افزایش مییابد.

Moridi و همکاران (2017) با استفاده از 2 مدل عددی برای پیشبینی غلظت رسوبات معلق در سیستم رودخانه- مخزن سد دز، که در دو دهه اخیر با مشکل جدی رسوب مواجه است و اثرات سناریوهای مختلف رسوبزدایی را بر زندگی آبزیان مورد مطالعه قرار دادند. آنها مقادیر مناسب برای زمان فلاشینگ، محدودیت غلظت رسوبات و دبی خروجی رسوبات از مخزن با استفاده از اطلاعات موجود و دادههای مربوط به عملیات قبلی رسوبزدایی و نیز اندازه گیری های رشته ای و مدل سازی، ارائه نمودند. طبق بررسیها و بر اساس محدودیتهای اجتماعی و زیستمحیطی، ماه مارس را بهعنوان زمان مناسب انجام عمليات رسوبزدايي انتخاب نمودند. همچنین بعد از شبیهسازی هیدرولیکی سناریوهای مختلف رسوبزدایی و مسیریابی رسوب در امتداد رودخانه، مقادیر دبی خروجی و غلظت خروجی رسوبات در عملیات فلاشینگ برای فصول خشک و تر (مقدار دبی 1275 و 800 متر مکعب بر ثانیه و غلظت رسوبات 30 و 20 گرم بر لیتر بهترتیب برای فصول خشک و تر) را ارائه نمودند.

Chaudhary و همکاران (2018) بهروش عددی، رسوب گذاری و رسوبزدایی را در مخزن سد Dri Limb واقع در کشور هندوستان بررسی نمودند. آنها بهروش عددی یک بعدی و با استفاده از حل عددی MIKE 11 با بررسی فرآیند رسوب گذاری در بلند مدت در مخزن سد مذکور دریافتند انباشت رسوبات در طی حدود 45 سال در مخزن Dri Limb اتفاق می افتد. ایشان همچنین با روش عددی 2 بعدی و با استفاده از حل عددی MIKE 21C عملیات فلاشینگ را برای دو نوع پروفیل رسوب گذاری محتمل ديگر و بهازاي 5 دبي جريان خروجي از مخزن بررسي نموده و دريافتند تقريباً بعد از گذشت 36 ساعت از شروع عمليات، رسوبات انباشته شده در بستر مخزن سد Dri Limb به پایداری می سد که در طی این مدت حدود 40 درصد از رسوبات انباشته شده در مخزن بهازاي دبي خروجي 1000 متر مكعب بر ثانيه به بيرون سد هدایت می گردد که در نهایت انجام سالانه عملیات رسوبزدایی با مدت زمان 36 ساعت و دبی خروجی 1000 متر مکعب بر ثانیه جهت مدیریت مؤثر رسوب در مخزن سد Dri Limb را توصیه نمودند.

Rehman و همکاران (2018) رسوبزدایی مخازن سدهای (سترالیا) (Gebidem (سوئیس) و Gmund (استرالیا) را

بهروش عددی یکبعدی به کمک حل عددی یکبعدی HEC-RAS بررسی نمودند. آنها ابتدا پروفیلهای طولی مربوط به دلتای رسوب را با استفاده از مقادیر مشاهده و ثبت شده انباشت رسوب، کالیبره و مدلسازی نموده و بعد با کمک دادههای مربوط به دبی خروجی و تراز آب مخازن، رسوبزدایی و تأثیر آن بر دلتاهای رسوب مدلسازی شده را شبیهسازی نمودند. همچنین به کمک دلتای رسوب مدلسازی شده، دبیهای خروجی (رسوبزدایی) متناظر، انباشت رسوبات و مدت زمان مورد نیاز برای شبیهسازی را برای هر سه سد بهدست آوردند.

و همکاران (2019) روند فلاشینگ تحتفشار در مخازن را بهصورت مدل آزمایشگاهی و عددی سهبعدی مورد بررسی قرار دادند. آنها با مقایسه نتایج حاصل از حل عددی سه بعدی جدی جفت شده<sup>1</sup> که با استفاده از مدلسازی و آنالیز توسط حل عددی جفت شده  $k - \varepsilon$  به روش  $k - \varepsilon$  به روش زمایشگاهی مقایسه و نتیجه دست آمده بود با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه و نتیجه گرفتند حل عددی به کاربرده شده قابلیت خوبی جهت بررسی و مطالعه رسوبزدایی تحتفشار دارد.

Haghjouyi و همکاران (2020)، تأثیر قرارگیری سازه بدون کف شاخهدار<sup>2</sup> در جلوی دریچه عمقی سد بر مخروط حاصل از رسوبزدایی را به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی تأثیر قرارگیری سازه مذکور با مقادیر زاویه بین شاخههای مختلف بر فلاشینگ تحتفشار و بهازای دبی خروجی، تراز رسوب متعدد و 4 نوع سازه و نیر یک حالت بدون قرارگیری سازه بدون کف، در قالب 45 آزمایش، مقادیر بهینه مربوط به پارامترهای مختلف را بهدست آورده و در نهایت با توجه به نتایج خروجی، یک معادله بدون بعد جهت محاسبه ابعاد مخروط

Idrees و همکاران (2021) بهروش عددی میزان رسوب-گذاری و عملیات رسوبزدایی در مخازن سدهای Nakdong و Sangjo را بررسی نمودند. آنها ابتدا با روش شبکه عصبی مصنوعی و با در نظر گرفتن دبی ورودی آب به مخزن، هد آب و جریان خروجی بهعنوان پارامتر، میزان رسوبگذاری در مخزن سد RESCON جریان خروجی بهعنوان پارامتر، میزان رسوبگذاری در مخزن سد معلیات فلاشینگ در مخزن سد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر آن بود که رسوبزدایی هیدرولیکی برای هردو سد مؤثر بود. Sangjo تنیجه گرفتند فلاشینگ کارآمد برای سش روز و با آنها همچنین نتیجه گرفتند فلاشینگ کارآمد برای شش روز و با تراز آب مخزن 40 متر و برای سد Radon نیازمند دبی خروجی تراز آب مخزن 40 متر و برای سد Radon مخزن 8/1 متر برای رسوبزدایی آزاد میباشد.

Lahijani و Pourbakhshian (2017) به کمک حل عددی توسط نرمافزار 3D -FLOW، رسوبزدایی در مخازن سدها بهروش معلق نمودن رسوبات را مورد مطالعه قرار دادند و با مقایسه اعمال این روش که در آن در زمان رسوبزدایی هوا به وسیله پمپهایی به درون رسوبات منتقل می شود، با روش فلاشینگ دریافتند که حجم رسوبات تخلیه شده در روش معلق نمودن رسوبات، تقریباً 10 درصد بیشتر از روش فلاشینگ می باشد.

Mahtabi و Karimi (2017) به روش آزمایشگاهی، با کارگذاری صفحات مستغرق با آرایش شعاعی در جلو دریچه عمقی، تأثیر آرایش مذکور در افزایش قدرت و جریان گردابی و افزایش عملکرد رسوبزدایی تحتفشار را بررسی نمودند. آنها بر اساس نتایج بهدست آمده، میزان بهبود عملکرد فلاشینگ تحتفشار نسبت به مدل شاهد را بهدست آوردند (بهطور متوسط در حدود 11/3 برابر) و بر اساس آن نتیجه گرفتند عملیات رسوبزدایی در وضعیت پر بودن مخزن، راندمان بالایی نسبت به انجام آن در وضعیت تخلیه آب مخزن دارد.

و همکاران (2019) با بررسی فیزیکی تأثیر نوع رسوبات از جنبه چسبنده و غیرچسبنده بودن بر حفره رسوبشویی ایجاد شده در رسوبزدایی تحتفشار، زمان به تعادل رسیدن مخروط رسوبشویی زمانی را بهدست آوردند (تقریباً بعد از 9-11 دقیقه). آنها همچنین در مورد رسوبات چسبنده نیز با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج آماری بهدست آمده از آزمایشها، رابطه پیشبینی غلظت متوسط رسوبات خروجی از دریچه عمقی را بهصورت نمایی و تابعی از ارتفاع رسوب بهدست آوردند.

Peykani و همکاران (2020) بهروش آزمایشگاهی، تأثیر به کارگیری تکپایه مربعی بالادست روزنه بر ابعاد و حجم مخروط رسوب شویی در رسوب زدایی هیدرولیکی تحت فشار را بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند استفاده از پایه مربعی تأثیر بسیار زیادی در افزایش حجم مخروط رسوب شویی داشته و نیز تأثیر قابل توجهی در افزایش طول و عرض مخروط رسوب شویی نسبت به حالت شاهد دارد.

در تحقیق حاضر که بهروش عددی تأثیر تغییر در پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مربوط به مخزن و رسوبات سد بر میزان رسوبات تخلیه شده به بیرون از مخزن سد و در نتیجه حجم ذخیرهای آزاد شده در اثر عملیات فلاشینگ تحتفشار از مخزن سدها بررسی شده، برای نخستین بار تأثیر یکنواختی ذرات رسوب در تراز انباشتهای مختلف رسوبات مخزن در کنار تأثیر غیریکنواختی دانهبندی ذرات رسوب با نسبت مساوی تشکیل دهنده ذرات با قطرهای بررسی شده در حالتهای مربوط به دانه-بندی یکنوخت در تراز انباشتهای مختلف رسوبات مخزن و نیز

2. Dentritic bottomless structure

<sup>1.</sup> Coupled

تأثیر تعداد دریچه فعال در زمان انجام عملیات در تراز انباشتهای مختلف ذرات رسوب بر حجم و هندسه حفره آبشستگی ناشی از از عملیات فلاشینگ و نیز درصد نسبی رسوبات خارج شونده از مخزن بررسی گردید؛ لذا اهداف مورد نظر یافتن موارد زیر میباشد: - تأثیر اندازه قطر متوسط ذرات رسوب انباشته شده در مخزن بر هندسه و حجم مخروط آبشستگی در حالت دانهبندی یکنواخت ذرات رسوب

- تأثیر غیر یکنواختی دانهبندی ذرات رسوب تهنشین شده در درون مخزن (با سهم برابر تشکیل دهنده ذرات با قطر متوسط بررسی شده در وضعیت دانهبندی یکنواخت) بر هندسه و حجم مخروط آبشستگی و مقایسه با حالت دانهبندی یکنواخت ذرات رسوب

 - تأثیر پرشدگی مخزن از رسوب (تراز رسوب در مخزن) بر هندسه و حجم مخروط آبشستگی

- تأثیر تعداد تخلیه کننده تحتانی بر هندسه و حجم مخروط
آبشستگی

نظر به این که هدف اصلی رسوبزدایی از مخازن سدها، احیای بیش ترین حجم ممکن تلف شده مخزن در اثر انباشت رسوبات میباشد، در تحقیق حاضر نیز منظور از بررسی متغیرهای ذکر شده، یافتن مناسب ترین مقدار مربوط به هر پارامتر میباشد؛ به -طوری که بهازای آن مقدار بیش ترین مقدار تخلیه رسوبات انباشته شده در مخزن اتفاق بیفتد. بدیهی است هرچه قدر رسوبات بیش -تری به بیرون از مخزن سد هدایت گردد، به معنای موفقیت آمیز بودن بیش تر طرح میباشد.

## 2- مواد و روشها 1-2- نرم افزار FLOW-3D

از نرمافزارهای قدرتمند در زمینه دینامیک سیالات است که توسط Flow Science, Inc گسترش و پشتیبانی شده و بهدلیل توانایی شبیهسازی میدان جریان بهصورت سهبعدی طیف کاربردی بزرگی در پژوهشهای علمی و صنایع مرتبط با دانش سیالات دارد. بهکارگیری شبکه آنالیز تشکیل شده از سلولهای مکعب مستطیل شکل در دو سیستم مختصات کارتزین و استوانهای شبیهسازی در این نرمافزار با حل معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، معادلات ناویر استوکس و معادلات انتقال رسوب و نیز پنج مدل حل آشفتگی انجام میگردد. اشغال حافظه کمتر و امکان تولید آسان و نیز استفاده از روشهای FAVOR و VOV جهت شناخت هندسه صلب و سطح آزاد سیال، از امتیازات سلولهای مکعب مستطیل شکل در شبیهسازی توسط نرمافزار 20 -FLOW می میباشند (Ghasem Zadeh).

- 2-2- معادلات حاكم
- 2-2-1- معادله پيوستگى

معادله پیوستگی برای سیالات غیرقابل تراکم به فرم معادله (1) نوشته میشود:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + (1)$$
$$\xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}$$

که  $V_F$  کسر حجمی جریان،  $\rho$  دانسیته سیال،  $R_{DIF}$  عبارت توزیع آشفتگی و  $R_{SOR}$  منبع جرم بوده و (U,V,W) مؤلفههای سرعت در راستاهای (X,Y,Z) میباشند؛ همچنین  $A_x$  مر  $A_z$  و  $A_z$  برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهات X و Y و Z بوده و مقدار ضریب R به نوع سیستم مختصات وابسته خواهد بود. عبارت  $R_{DIF}$  در سمت راست معادله پیوستگی جرم مطابق معادله (2) برابر با عبارت توزیع آشفتگی میباشد:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \upsilon_{\rho} A_{x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( \upsilon_{\rho} A_{y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \upsilon_{\rho} A_{z} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho \upsilon_{\rho} A_{x}}{x}$$
(2)

به طوری که ضریب  $v_{\rho}$  برابر  $P_{P}$  است که  $\mu$  برابر ضریب لزجت بوده و  $C_{P}$  ثابتی است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت میباشد. این نوع توزیع جرم فقط در فرآیندهای اختلاط آشفتگی در سیالات دارای گرادیان غیریکنواخت چگالی، قابل استفاده هستند. عبارت  $R_{SOR}$  در سمت راست معادله پیوستگی جرم، مربوط به دانسیته میباشد که در مواردی همچون تزریق جرم از خلل و فرج یک دیواره کاربرد خواهد داشت. در معادله پیوستگی برای سیال غیرقابل تراکم، جرم مخصوص مقدار ثابتی داشته و معادله (1) به صورت معادله (3) قابل تغییر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R\frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_Z) + \qquad (3)$$
$$\xi \frac{\rho uA_x}{x} = \frac{R_{SOF}}{\rho}$$

#### 2-2-2 معادلات مومنتم (معادلات ناویر - استوکس)

معادلات حرکت یا همان معادلات ناویر- استوکس برای مؤلفههای سرعت سیال (U, V, W) در جهات سهگانه طبق روابط ( $G_x, G_y, G_z$ ) معادلات ( $G_x, G_y, G_z$ ) معادلات ( $G_x, G_y, G_z$ ) شتابهای بدنه، ( $F_x, F_y, F_z$ ) شتابهای ناشی از لزجت، ( $L_z$ ,  $v_y$ ( $h_y, b_z$ ) افت جریان در محیطهای متخلخل و عبارات انتهایی در طرف ( $h_x$ ) افت جریان در محیطهای متخلخل و عبارات انتهایی در طرف ( $h_x$ ) مورب به تزریق جرم در سرعت صفر می باشد؛ همچنین ( $w_x, w_y, w_y$ ) = W مؤلفههای سرعت جزء منبع بوده و ( $w_x, v_x, w_s$ ) = S مؤلفههای سیال در سطح منبع نسبت به خود آن می باشد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ &+ \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_S) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ &+ \xi \frac{A_y uv}{xV_F} = \\ -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y \\ &- \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_S) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \\ &- \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_S) \end{aligned}$$

#### 2-2-3- معادلات انتقال رسوب

نرمافزار انتقال رسوب FLOW-3D قابلیت انجام محاسبات مربوط به انتقال رسوبات معلق در جریان، انتقال مواد بستر تحت تأثیر جهش یا غلتش، ورود رسوبات به درون جریان تحت تأثیر آشفتگی جریان و تنش برشی و تهنشینی رسوبات تحت تأثیر شتاب گرانش را دارا است. رسوبات به دو فرم رسوبات معلق و رسوبات متراکم قابل تعریف میباشند؛ بهطوریکه رسوبات معلق مقدار غلظت کمی داشته و همراه سیال اول در مدل حرکت میکنند در حالیکه رسوبات متراکم در موقعیت تخصیص داده شده قرار داشته و تحت تأثیر تنش برشی جریان در بستر شروع به حرکت خواهند کرد.

#### 2-2-4- شبیهسازی آشفتگی

شبیهسازی آشفتگی در FLOW- 3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این حل عددی صورت می گیرد که عبارتند از: طول اختلاط پرانتل، یک معادلهای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادلهای  $\varepsilon - \varepsilon$ ، مدل گروههای نرمال شده أشفتگی، مدل دو معادلهای  $K - \varepsilon$  مدل گروههای نرمال شده RNG مدل شبیهسازی گردابههای بزرگ LES<sup>2</sup>. در مطالعه حاضر با توجه به این که از مدل  $\varepsilon - \varepsilon$  استفاده شده است، لذا مدل مذکور در ادامه به اختصار تشریح شده است.

مدل  $\varepsilon$  از دو معادله انتقال انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاک آن تشکیل شده و آشفتگی جریان را با تقریب خوبی برای انواع جریانها آنالیز میکند. معادله انتقال اتلاف آشفتگی که با  $\varepsilon_T$  نشان داده میشود، طبق رابطه (5) بهدست میآید:

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1.\varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3.G_T) + Diff_{\varepsilon} - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T}$$
(5)

که در آن، CDIS1، CDIS2 و CDIS3 پارامترهای بدون بعد میباشند که اندازه آنها توسط کاربران تعیین می گردد و مقدارهای پیشفرضشان در مدل k – e بهترتیب برابر 1/44، 1/92 و 0/2 میباشند. Diff نیز توزیع اتلاف انرژی جنبشی است که از رابطه (6) (FLOW-3D, 2008) حاصل می شود.

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_{F}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\varepsilon} A_{x} \frac{\partial \varepsilon_{T}}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\varepsilon} A_{y} R \frac{\partial \varepsilon_{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{\varepsilon} A_{z} \frac{\partial \varepsilon_{T}}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_{\varepsilon} A_{x} \varepsilon_{T}}{x} \right\}$$
(6)

#### 2-3- صحتسنجی

جهت صحتسنجی نرمافزار، از نتایج تحقیق آزمایشگاهی Moghadam-Fathi و همكاران (2010) بهعنوان مقادیر معیار بهره برده شد. آزمایشهای مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هيدروليک دانشگاه اهواز در فلوم عريضي بهطول 2/3 متر، عرض 1/5 متر و ارتفاع 4 متر جهت مدلسازی فلاشینگ تحتفشار و تعیین پارامترهای مؤثر بر حجم و طول مخروط حاصل از رسوب-زدایم، هیدرولیکی تحتفشار، انجام شده بود. یک متر اول از طول فلوم جهت برقراری هد ثابت ورودی به سمت رسوبات مخزن که تا تراز 0/42 متری از کف مخزن انباشته شده بود، در نظر گرفته شده بود. با رسیدن آب مخزن به تراز مطلوب، شیر خروجی به قطر 2 اينچ، جهت اجراي قسمت اصلي آزمايش (رسوبزدايي هیدرولیکی تحتفشار) باز شده بود. جریان خروجی از مخزن (آب و رسوب) در قسمت اول یک حوضچه تهنشینی رسوبات بهطول 3/5 متر، عرض 1/0 متر و ارتفاع 0/8 متر زهکشی میگردید؛ به طوری که دبی جریان خروجی توسط یک سرریز ۷ شکل، اندازه-گیری می گردید. همچنین آب به طور مداوم در سیستم توسط تجهیزات پمپ و مکش در جریان بود. رسوبات به کار برده در آزمایشها از نوع غیرچسبنده و با دانسیته 2650 کیلوگرم بر مترمكعب با سه نوع سايز قطر متوسط 0/27 ميليمتر (ريزدانه)، 0/42 میلیمتر (دانه با سایز متوسط) و 1/20 میلیمتر (درشت-دانه) بودند. تصویر مدل آزمایشگاهی در شکل (2) آمده است.

<sup>1.</sup> Renormalized Group (RNG)

<sup>2.</sup> Large Eddy Simulation (LES)



آزمایشها بهازای سه تراز آب (*H*<sub>W</sub>) بهصورت 0/52 متر، 0/9 متر و 1/2 متر از کف مخزن، پنج مقدار دبی خروجی از مخزن بهصورت 0/008 m³/s ≥ 2 ≥ 0/001 و سرعت خروجی بهصورت Fathi-Moghadam) انجام شده بودند (0/51≤1/2×4/08m/s همكاران، 2010). در بين نتايج خروجي ارائه شده تحقيق آزمایشگاهی، نتایج "تأثیر دبی بر طول وحجم مخروط رسوب-شویی" بهازای تراز آب مخزن 1/2 متر و در وضعیت آزمایش با رسوبات با اندازه قطر 0/42 میلیمتر و در وضعیت دبی جریان خروجی برابر 4/5 لیتر بر ثانیه بهعنوان معیار در صحتسنجی تحقيق حاضر قرار گرفت. مطابق شكل (3) طول مخروط ناشى از فلاشینگ در مدل آزمایشگاهی برابر با 0/52 متر و حجم آن برابر با 0/043 متر مكعب بهدست آمده است. در حل عددی با نرمافزار  $k - \varepsilon$  نتایج حاصل از آنالیز مدل با مدل حل آشفتگی FLOW-3D در سه وضعیت حل با معادلات انتقال رسوب Meyer-Peter، Nielsen و Van-Rijn با یک دیگر مقایسه شده و نتایج حاصل در جدول (1) درج گردید.



میان ۵ - طون (۵) و طبق (۲) طور (موب سویی به رای دیی (*a*) برای رسوبات با قطرهای متوسط (*d*50) آزمایش شده (2010 و همکاران، **2010)** 

جدول 1- نتایج صحتسنجی فلاشینگ تحتفشار به کمک حل عددی توسط FLOW-3D

درصد خطای ۷	V (m³/s)	درصد خطای L	L (m)	معادله انتقال رسوب
8	0 /0396	3/8	0/500	Meyer-Peter
7/7	0/0397	3/7	0/501	Nielsen
9/3	0/047	4/4	0/543	Van Rijn

نتایج حاصل از آنالیز با استفاده از هر سه معادله انتقال رسوب قابل قبول میباشد ولی با توجه به این که در آنالیز با استفاده از معادله Nielsen بعداز گذر مدتی از شبیهسازی، پردازش مدل به شدت سنگین و وقتگیر شد؛ همچنین در آنالیز با استفاده از معادله Van-Rijn در طول شبیهسازی بهویژه در اوایل آن، گام زمانی از حداقل ممکن کمتر میشد و در نتیجه شبیهسازی قبل از رسیدن به ثانیه مورد نظر و در مراحل ابتدایی خاتمه مییافت. در نتیجه شبیهسازی با گامهای زمانی بسیار کم ( کمتر از 2/0 ثانیه) آنالیز می گردید. این امر موجب میشد تعداد مراحل شبیه-سازی بسیار افزایش یافته و در نتیجه پروسه شبیهسازی بسیار طولانی شده حجم اشغال شده توسط مدل عددی در حافظه کامپیوتر نیز بسیار زیاد میشد. از اینرو معادله انتقال رسوب در نظر گرفته شد.

## 2-4- تعریف مدلهای مورد بررسی

مدلهای بررسی شونده شامل 18 مدل میباشند که در آنها طول مخزن 1 متر، عرض آن 1/4 متر، ارتفاع دیواره سد 6/6 متر، همینطور دریچههای در تراز 200/0 متری از کف مخزن و در وسط عرض دیواره سد قرار دارند. و برای مدلهای با بیش از یک دریچه عمقی فاصله بین دریچهها 0/10 متر بوده و با آرایش متقارن در وسط عرض دیواره سد قرار دارند. شکل (4) تصویر مقطع طولی و مقطع عرضی مدلها را بهترتیب برای مدلهای یک دریچهای، دو دریچهای و سه دریچهای نشان میدهد. در تمامی مدلها، تراز آب مخزن (*H*) 5/0 متر از کف مخزن و دبی جریان خروجی از هر دریچه عمقی برابر 0/003 متر مکعب بر ثانیه و نیز طول تمامی دریچههای عمقی 30/00 متر و مقطع آنها مربعی با ضلع 50/00 متر میباشد.

هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی تأثیر تغییر در متغیرهایی نظیر تراز انباشت رسوبات در مخزن، اندازه قطر متوسط دانههای رسوب، یکنواختی و غیر یکنواختی دانههای رسوب و تعداد کارکرد همزمان دریچههای تحتانی سد بر ابعاد و حجم مخروط ناشی از عملیات فلاشینگ که برابر حجم رسوبات تخلیه شده شده از مخزن است، میباشد. لذا ذرات رسوب با سه اندازه قطر متوسط است، میباشد. لذا ذرات رسوب با سه اندازه قطر متوسط و 0/00027 متر (درزدانه)، 2000/0 متر (رسوبات با قطر متوسط) و 0/00081 متر (درشتدانه)، که سایر مشخصاتشان برابر بوده و هر سه نوع دارای دانسیته 2650 کیلوگرم بر متر مکعب بودند، در قر سه نوع دارای دانسیته 2650 کیلوگرم بر متر مکعب بودند، در متاماً درشتدانه و در 1 حالت دانهبندی غیر یکنواخت که شامل رسوبات از هر سه نوع دانهبندی با سهم تشکیل دهنده مساوی هستند، در سه تراز انباشتگی (Hs) 0/20 متر، 30/0 متر و 25/0

متر از کف مخزن و در حالت تک دریچه بررسی شدند که 12 مدل می اشد، همچنین جهت بررسی تأثیر تعداد دریچه فعال به طور هم زمان بر حفره رسوب زدایی، رسوبات یکنواخت متوسط دانه، علاوه بر حالت تک دریچه (3 مدل)، در دو حالت دو دریچه (3 مدل) و سه دریچه (3 مدل) نیز بررسی شدند؛ در نتیجه مجموعاً تعداد 18 مدل جهت پیش برد اهداف مطالعه حاضر بررسی شدند.



شکل 4- الف) نمای طولی سد و مخزن انباشته از رسوب، ب) نمای عرضی مربوط به دیواره سد در حالت کارکرد تکدریچه، پ) دو دریچه، ت) سه دریچه

#### 2-4-1 ایجاد هندسه مدلها و شبکهبندی

جهت مشبندی مدلها از شبکهبندی کارتزین با تخصیص تعداد و اندازه ابعاد سلول در هریک از راستاهای سه گانه X، Y و Z با اندازه ابعاد سلول متغیر بهطوریکه جهت شبیهسازی دقیق *تر* عبور جریان انتقال رسوب از طریق دریچههای تحتانی سد اندازه سلولها در مناطق دریچهها و اطراف آنها ریزتر بوده و با حرکت به سمت نواحی شامل مرز ورودی مخزن (برای ابعاد سلولها در جهت X)، دیوارههای جانبی مخزن (برای ابعاد سلولها در جهت

Y) و بالای مخزن (برای ابعاد سلولها در جهت Z) که نواحی دورتر نسبت به محدوده حضور دریچههای عمقی بودند، اندازه ابعاد سلولها درشت تر می گردید، در نظر گرفته شد. در هریک از مدل-های عددی بررسی شده، یک بلوک مش شامل محدوده مخزن (تا دیواره سد) جهت شبیه سازی محدوده مخزن و بهازای هر دریچه تحتانی یک شبکه از ابتدای دیواره سد تا فاصله کوتاهی در پایین-دست سد جهت شبیه سازی محدوده دریچه و جریان رسوبی خروجی گذرنده از آن، که با دبی مشخصی (2003 متر مکعب بر ثانیه بهازای هر دریچه عمقی) در حال خروج از مخزن است، در نظر گرفته شد؛ در نتیجه برای هریک از مدلهای تک دریچه ای، نظر گرفته شد؛ در نتیجه برای هریک از مدلهای تک دریچه ای دو دریچه ای و سه دریچه ای، به ترتیب تعداد 2، 3 و 4 بلوک مش ایجاد گردید.

#### 2-4-2- شرايط مرزى

شرط مرزی در نظر گرفته شده برای مدلها در جدول (2) جمع بندی شدهاند.

نوع شرط مرزى	موقعيت مرز شبكهآناليز	رديف
Specified pressure	ورودى مخزن	1
Wall	دیوارههای مخزن	2
Symmetry	مرز فوقاني شبكهها	3
Wall	کف شبکهها	4
Volume flow rate	خروجي مخزن	5
Volume flow rate	ورودی شبکههای شامل دریچهها	6
Mall Summatry	کنارەھای شبکەھای شامل	7
wan, symmetry	دریچەھا	,
Symmetry	وجه مشترک شبکههای شامل	8
Symmetry	دریچەھا	0
Quitflow	مرزهای خروجی میدان آنالیز	0
Outnow	در پاییندست سد	7

جدول 2- شرطهای مرزی استفاده شده در تحقیق حاضر

## 2-4-3- شرايط اوليه

شرایط ابتدایی با توجه به پدیده مورد بررسی میتواند وجود یک ناحیه پر از سیال در درون شبکه آنالیز هنگام آغاز شبیهسازی، نحوه توزیع فشار و یا درجه حرارت اولیه در محیط میباشند (Ghasem Zadeh، 2018). در مسئله رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار، اولاً توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیک در عمق مخزن؛ ثانیاً تعریف نواحی سیال به مدل شامل کف مخزن تا تراز آب مخزن و نواحی پر از سیال مربوط به دریچههای تحتانی سد بهعنوان شرایط ابتدایی در نظر گرفته میشوند؛ در نتیجه تعداد دو، سه و چهار ناحیه سیال به ترتیب برای مدلهای یک، دو و سه دریچهای تعریف گردید.

#### 2-4-4- زمان مناسب شبيهسازی

با توجه به این که در پدیده فلاشینگ تحتفشار، عوامل هندسی و هیدرولیکی متعددی همچون ابعاد مدل، تراز رسوبات، مشخصات دانههای رسوب، مدل آشفتگی، دبی جریان خروجی از دریچهها و غیره بستگی دارد، بعد از انجام شبیهسازیهای متعدد و رسیدن مدلها به همگرایی مناسب، بهطوری که بعد از آن زمان تغییرات مهمی در ابعاد حفره رسوب شویی اتفاق نیافتد، زمان مناسب شبیه سازی تعیین می گردد. در تحقیق حاضر با آنالیز مدل مربوط به حالت تک دریچه با رسوبات در شت دانه انباشته شده در تراز 25/0 متری کف مخزن و ملاحظه نمودن برقراری شرایط پایداری، زمان 45 ثانیه جهت شبیه سازی هر یک از مدل ها در نظر گرفته شد.

## 3- نتایج و بحث 3-1- نحوه استخراج خروجیهای آنالیز سهبعدی

با آنالیز مدلهای عددی در تحقیق حاضر مشاهده گردید حداکثر طول مخروط رسوبزدایی در صفحه گذرنده از وسط مخزن و عمود بر دیواره سد و حداکثر عرض آن نیز در دیواره بالادستی سد (ابتدای محدوده مخزن) ایجاد می گردد. شکل (5) بهطور شماتیک نمای مخروط رسوبزدایی را در تراز سطح رسوبات مخزن، صفحه گذرنده از وسط مخزن در جهت طولی مخزن و دیواره بالادستی سد نشان میدهد. در شبیهسازی توسط نرمافزار FLOW-3D، جهت مشاهده نتايج مربوط بهطول حداكثر مخروط رسوبزدایی، از خروجیهای دو بعدی مربوط به کسر رسوبات انباشته شده<sup>1</sup> بر صفحه گذرنده از وسط سد و مخزن در راستای نیم رخ طولی (صفحه xz و y=0.7m) در بازه شبیه سازی شده مسأله (صفر تا 45 ثانيه) استفاده گرديد. همين طور از همين روش جهت مشاهده تغییرات عرضی مخروط در محل مرز دیواره بالادستی سد (صفحه yz و x=0) استفاده گردید. جهت برآورد حجم مخروط حاصل از عمليات رسوبزدايي هيدروليكي تحتفشار که برابر حجم رسوبات خارج شده از مخزن در طی عملیات است، با توجه به عملکرد گرافیکی نسبتاً ضعیف نرمافزار FLOW-3D در نمایش سهبعدی شبیهسازیها، نتایج متنی استخراج شده ارتفاع ناحیه<sup>2</sup> را در برنامه Surfer وارد نموده و با شبيهسازى سهبعدى هندسه مربوط به حفره ايجاد شده بهكمك درونیابی در برنامه، حجم حفره مخروطی شکل محاسبه شده و در قالب یک فایل گرید<sup>3</sup>، توسط برنامه Surfer ارائه گردید.





## 3-2- گردآوری نتایج حاصل شده

تصاویر مربوط به خروجی دوبعدی کسر رسوبات انباشته شده در صفحه گذرنده از وسط مخزن در راستای نیمرخ طولی مخزن جهت مشخص نمودن طول مطابق شکل (6) و در صفحه منطبق بر دیواره بالادستی سد مطابق شکل (7) استخراج شدند؛ هندسه سهبعدی حفره رسوبزدایی برآورد شده در برنامه Surfer، در شکل (8) آورده شدهاند. بعد از استخراج هندسه حفره رسوب-احیا شده مغزن و نیز درصد نسبی رسوبات خارج شده از مغزن زدایی، مقادیر خروجی بهدست آمده بههمراه درصد حجم ذخیره طی عملیات رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار، جهت مرتب-سازی برای ترسیم نمودارها و تفسیر آنها ابتدا در جدول (3) گردآوری شدند. درصد حجم احیا شده مخزن برابر با نسبت رسوبات خارج شده از مخزن به حجم ذخیره کل مخزن بهصورت درصد میباشد که در حالت تراز نرمال آب مخزن (برابر با 5/0 متر برای تمام مدلها در مطالعه حاضر) در نظر گرفته شد؛ همین طور

<sup>1.</sup> Sediment packed volume fraction

<sup>2.</sup> Terrain elevation

نسبت حجم رسوبات خروجی به حجم کل رسوبات انباشته شده در مخزن بهصورت درصد برابر با درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن در نظر گرفته شد. در جدول (3) تمام کمیتهای از جنس طول برحسب متر و احجام ارائه شده برحسب مترمکعب

میباشند؛ همچنین مقادیر مربوط به حجم کل مخزن و حجم اشغال شده مخزن توسط رسوبات در ترازهای مختلف برحسب مترمکعب در جدول (4) ارائه شده است.



شکل 6- تصاویر حداکثر طول حفره رسوبزدایی بعد از آنالیز مدلها



شکل 7- تصاویر حداکثر عرض حفره رسوبزدایی بعد از آنالیز مدلها



شکل 8- تصاویر سهبعدی حفره رسوبزدایی بهدست آمده در Surfer بعد از آنالیز مدلها (واحد هر سه محور برحسب متر)

3-3- تفسير نتايج حاصل شده

**3-3-1-** بررسی تأثیر تراز انباشت رسوبات بر طول، عرض و حجم مخروط رسوبزدایی

3-3-1-1- بهازای رسوبات با دانهبندی یکنواخت و غیریکنواخت

همان طور که از شکل (9) ملاحظه می گردد، طول، عرض و حجم حفره رسوب شویی و در نتیجه میزان حجم احیا شده مخزن برای هر دو نوع دانهبندی رسوب یکنواخت شامل تماماً ریزدانه، تماماً متوسط دانه و تماماً درشتدانه و دانهبندی غیر یکنواخت با افزایش تراز انباشت رسوب در مخزن افزایش مییابد و عرض مخروط بیشتر از طول آن میباشد. اندازه و نحوه تغییر ابعاد و

حجم مخروط تشکیل شده در حالت دانهبندی غیریکنواخت در تراز انباشت 0/25 متر مابین حالت دانهبندی یکنواخت با رسوبات و 0/35 متر ما بین حالت دانهبندی یکنواخت با رسوبات با دانه-و 1/20 متر ما بین حالت دانهبندی یکنواخت با رسوبات با دانه-بندی متوسط و درشتدانه میباشد (در حالت کلی به حالت ذرات با دانهبندی متوسط نزدیکتر است). در تمامی حالتها به جز حالت ریزدانه که در آن درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن در تراز 0/3 متر بیشینه میباشد، میزان نسبی رسوبات خارج شده با افزایش تراز رسوبات مخزن، افزایش مییابد؛ در نتیجه میتوان دریافت در مدل با تراز 25/0 رسوبات ریزدانه حداکثر درصد احیای حجم ذخیره مخزن صورت گرفته و در حالت 1/3 متر رسوبات ریزدانه بیشترین میزان نسبی رسوب از مخزن خارج شده است.

					-				
درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن	درصد حجم احیا شدہ کل مخزن	حجم حفره رسوب- شویی (m <sup>3</sup> )	عرض حفرہ رسوبشویی (m)	طول حفره رسوبشویی (m)	تراز انباشت رسوب (m)	قطر متوسط رسوب (m)	نوع دانەبندى رسوب	تعداد دریچه	رديف
5/2	2/60	0/0182	0/8034	0/3802	0/25	متشکل از هر سه	غيريكنواخت	1	1
5/52	3/31	0/02319	0/8835	0/4302	0/30	نوع سايز رسوب با	غيريكنواخت	1	2
6/1	4/27	0/02990	0/9312	0/4647	0/35	سهم مساوی	غيريكنواخت	1	3
5/25	2/63	0/01837	0/8254	0/3965	0/25	0/00027	يكنواخت	1	4
7/13	4/28	0/02996	0/9673	0/4669	0/30	0/00027	يكنواخت	1	5
6/53	4/57	0/03197	0/9836	0/4796	0/35	0/00027	يكنواخت	1	6
4/93	2/46	0/01723	0/7721	0/3693	0/25	0/00081	يكنواخت	1	7
5/42	3/25	0/02276	0/8568	0/4126	0/30	0/00081	يكنواخت	1	8
5/65	3/96	0/02769	0/9115	0/4611	0/35	0/00081	يكنواخت	1	9
5/14	2/57	0/01799	0/7907	0/3769	0/25	0/00042	يكنواخت	1	10
5/63	3/38	0/02366	0/896	0/4273	0/30	0/00042	يكنواخت	1	11
6/37	4/46	0/03122	0/9407	0/4662	0/35	0/00042	يكنواخت	1	12
8/19	4/09	0/02865	1/0479	0/4847	0/25	0/00042	يكنواخت	2	13
8/50	5/10	0/03572	1/0857	0/5237	0/30	0/00042	يكنواخت	2	14
12/45	8/71	0/06099	1/40	0/7359	0/35	0/00042	يكنواخت	2	15
8/93	4/47	0/03126	1/11	0/5123	0/25	0/00042	يكنواخت	3	16
8/77	5/26	0/03683	1/1738	0/5571	0/30	0/00042	يكنواخت	3	17
16/06	11/24	0/07869	1/40	0/7694	0/35	0/00042	يكنواخت	3	18

#### جدول 3- جمع بندی اولیه نتایج حاصل از آنالیز مدل های عددی

جدول 4- مقادير حجم مخزن و رسوبات

	احجام مربوطه	رديف
0/70	حجم ذخیره کل مخزن در حالت تراز نرمال آب <b>(</b> m <sup>3</sup> )	1
0/35	حجم رسوبات مخزن در تراز انباشت 0/25 متر (m <b>3)</b>	2
0/42	حجم رسوبات مخزن در تراز انباشت 0/30 متر (m <b>3)</b>	3
0/49	حجم رسوبات مخزن در تراز انباشت 0/35 متر (m <b>3)</b>	4



شکل 9- نمودار تأثیر تراز انباشت رسوبات مخزن بر: الف) طول مخروط، ب) عرض مخروط، ج) حجم مخروط، د) درصد حجم ذخیرهای احیا شده مخزن، ت) درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن برای رسوبات ریزدانه، متوسطدانه و درشتدانه و رسوبات با دانهبندی غیریکنواخت

## 3-3-1-2- با در نظرگیری تعداد دریچههای فعال بهطور همزمان

با توجه به شکل (10) به نظر می سد با افزایش تراز انباشت رسوبات در مخزن، طول، عرض، حجم حفره و نتیجتاً درصد حجم احیا شده مخزن و همچنین درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن نیز برای مدلها با تعداد دریچه تحتانی متفاوت افزایش میابند که این افزایش در مدلهای بیش از یک دریچه و برای تراز بیش از 3/0 متر انباشت رسوب با شدت بیش تری صورت می-گیرد؛ به طوری که به ازای تراز رسوبات 35/0 متر از کف مخزن، کل رسوبات مجاور دیواره بالادستی سد در هر دو حالت دو دریچه و

سه دریچه شسته میشوند (عرض مخروط رسوبزدایی برابر با عرض دیواره سد، 1/40 متر، میباشد). همچنین در تمام مدلها، عرض حفره رسوبزدایی بیشتر از طول آن میباشد. مطابق شکل -های (9-ت) و (9-ث) بیشترین مقدار درصد حجم احیا شده مخزن و نیز بیشترین مقدار درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن بهازای تراز انباشت 25/0 متر از کف مخزن و کارکرد سه دریچه اتفاق میافتد.



شکل **10-** نمودار تأثیر تراز انباشت رسوبات مخزن بر: الف) طول مخروط رسوبزدایی، ب) عرض مخروط رسوبزدایی، پ) حجم مخروط رسوبزدایی، ت) درصد حجم ذخیره احیا شده مخزن، ث) درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن در حالت کارکرد تعداد متغیر دریچهها

## 3-3-2- بررسی تأثیر اندازه قطر متوسط رسوب بر طول، عرض و حجم مخروط رسوبزدایی

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر هندسه و حجم مخروط رسوب-زدایی، اندازه قطر متوسط ذرات رسوب میباشد. همان گونه که در شکل (11) مشاهده می گردد، افزایش اندازه قطر متوسط رسوبات در تمام ترازهای انباشت رسوب مورد بررسی موجب کاهش در طول، عرض و حجم حفره رسوبزدایی و در نتیجه کاهش میزان حجم ذخیرهای احیا شده مخزن و همچنین کاهش درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن می گردد. همچنین عرض حفره رسوبزدایی در تمام مدلهای بررسی شده از طول آن بیش تر خواهد بود.



الف) طول مخروط رسوبار تاییز عطر عرب رسوب نیاری برا الف) طول مخروط رسوبازدایی، ب) حجم مخروط رسوبازدایی، پ) درصد حجم ذخیرهای احیا شده مخزن به ازای تراز انباشت متغیر رسوبات

همینطور بیشترین میزان احیای حجم ذخیرهای مخزن در تراز انباشت 0/35 متر از کف مخزن برای رسوبات ریزدانه و بیش-ترین میزان درصد نسبی خروج رسوبات از مخزن در تراز انباشت 0/30 متر از کف مخزن برای رسوبات ریزدانه اتفاق میافتد.

3-3-3- بررسی تأثیر تعداد دریچههای عمقی فعال بهطور همزمان برای رسوبات با اندازه قطر متوسط 0/00042 متر در تراز انباشتهای مختلف بر طول، عرض و حجم مخروط رسوبزدایی

بررسی تأثیر تعداد کارکرد همزمان دریچههای عمقی مخزن در زمان رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار مخزن سد بر میزان رسوبات شسته شده از مخزن از منظر اقتصادی، اتلاف آب به ویژه در زمان کم آبی و نیز مسال محیط زیستی ضروری خواهد بود. شکل (12) که تغییرات وضعیت حفره رسوبزدایی به ازای تغییر در تعداد کارکرد دریچههای عمقی را نمایش میدهد، بیانگر آن است که با افزایش تعداد دریچههای تحتانی فعال سد، طول، عرض، حجم، درصد احیای حجم مخزن و نیز درصد نسبی رسوبات خارج شونده از مخزن نیز افزایش خواهد یافت. همچنین عرض حفره در تمام مدلها از طول آن بیشتر می باشد. در حالت فعالیت هم زمان سه دریچه عمقی با تراز انباشت رسوبات 0/35 متر از کف مخزن، بیشترین درصد حجم ذخیره از بین رفته در اثر رسوبگذاری در مخزن احیا شده و نیز در حالت مذکور بیشترین مقدار درصد نسبی خروج رسوبات از مخزن اتفاق خواهد افتاد؛ همینطور با توجه به این که مطابق نتایج ارائه شده شدت افزایش هندسه مخروط رسوبزدایی و نیز درصد احیای حجم مخزن و درصد نسبی رسوبات خروجی از مخزن، در ترازهای رسوب پایینتر از 0/35 متر و بهازای فعالیت همزمان بیشتر ازدو دریچه کمتر می-باشد. لذا بهنظر مىرسد در وضعيتهاى تراز پايينتر انباشت رسوبات در مخزن استفاده از دو دریچه جهت رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار موجب هدر رفت کمتر آب ذخیره شده در مخزن سد، آسیب وارد شده کمتر به محیط زیست در اثر عملیات رسوبزدایی و نیز مقرون بهصرفهتر باشد.





شکل 12- نمودار تأثیر تعداد دریچههای عمقی بر: الف) طول مخروط رسوبزدایی، ب) عرض مخروط رسوبزدایی، پ) برحجم مخروط رسوبزدایی، ت) درصد حجم ذخیرهای احیاشده مخزن، ث) درصد نسبی رسوبات خارج شده از مخزن بهازای تراز متفاوت انباشت رسوبات

#### 4- نتیجهگیری کلی

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر در تغییرات مربوط به تراز انباشت رسوبات در مخزن، قطر متوسط دانههای رسوب، یکنواختی و غیر یکنواختی در دانهبندی ذرات رسوب و تعداد کارکرد همزمان دریچههای عمقی بر ابعاد و حجم مخروط حاصل از رسوبزدایی هیدرولیکی تحتفشار و یافتن حالتی بود که بهازای آن بیشترین میزان رسوب از مخزن خارج گردد که نیل بدین امر، بعد از انجام صحتسنجی موضوع فلاشینگ تحتفشار به کمک شبیهسازی توسط نرمافزار 3D -FLOW تعداد 18 مدل جهت بررسی تعریف گشته و بعد از آنالیز و استخراج خروجیها، نتایچ در قالب نمودار ارائه و تشریح گردیدند. در ادامه نتایج بهدست آمده در هفت بند خلاصه و ارائه شدهاند:

1) هندسه و حجم مخروط حاصل از رسوبزدایی تحتفشار با افزایش تراز رسوبات انباشته شده در مخزن افزایش مییابد.

2) هندسه و حجم مخروط رسوبزدایی با افزایش قطر متوسط ذرات رسوب کاهش مییابد.

3) هندسه و حجم مخروط رسوبزدایی در وضعیت دانهبندی غیر یکنواخت ذرات رسوب که متشکل از ذرات با سه اندازه قطر متوسط 0/00027 متر، 0/00042 متر و 0/00081 متر با نسبت برابر، بهازای تراز انباشت 20/5 متر مابین هندسه و حجم آن در وضعیت دانهبندی یکنواخت رسوب با ذرات ریزدانه (0/00027 متر) و ذرات رسوب با اندازه قطر متوسط (0/00042 متر) و بهازای ترازهای انباشت 0/00 متر و 35/0 متر مابین مقدار هندسه و حجم آن در وضعیت دانهبندی یکنواخت ذرات رسوب با اندازه قطر متوسط (0/00042 متر) و ذرات رسوب با اندازه قطر متوسط (0/00042 متر) و ذرات رسوب درشتدانه (قطر متوسط 1800/0 متر) و ذرات رسوب درشتدانه (قطر متوسط 10/00042 متر) بهدست میآید و خیلی نزدیک به متوسط آن در دانهبندی یکنواخت رسوبات با سایز متوسط میاشد.

4) افزایش تعداد دریچهها باعث افزایش هندسه و حجم مخروط رسوبزدایی می گردد که البته برای ترازهای کمتر (کمتر از 0/35 متر از کف مخزن)، شدت افزایش میزان رسوبزدایی در وضعیت دو دریچهای و سه دریچهای کمتر می گردد؛ لذا برای ترازهای پایین تر (کمتر از 60 درصد عمق نرمال آب مخزن) انباشت رسوبات، انجام فلاشینگ تحتفشار در وضعیت دو دریچهای از جهات اتلاف کمتر آب، آسیب کمتر به محیط زیست و مسائل محیط زیستی ارجح خواهد بود.

5) در تمام وضعیتهای مدلهای عددی آنالیز شده، عرض مخروط حاصل از رسوبزدایی بیشتر از طول آن می-باشد.

6) در بین مدلهای عددی بررسی شده، مدل با کارکرد همزمان سه دریچه عمقی و تراز انباشت رسوبات با دانهبندی

یکنواخت 0/0004 متر در 0/35 متر از کف مخزن، بیش ترین مقدار ممکن رسوبات از مخزن خارج می گشت (0/07869 متر مکعب) که در نتیجه بیش ترین درصد حجم از بین رفته مخزن سد تحت اثر انباشت رسوبات مجدداً احیا می گردید (11/24 درصد)؛ همچنین در مدل مذکور بیش ترین مقدار درصد نسبی خروج رسوبات از مخزن اتفاق می افتاد (16/06 درصد)؛ در نتیجه مدل نام برده شده، موفق ترین نتیجه را در بین تمام حالتهای بررسی شده داشت.

7) جهت دستیابی به یک عملیات رسوبزدایی تحتفشار موفق در حالت تراز ثابت آب مخزن، دبی خروجی با مقدار ثابت از هر دریچه تحتانی، تراز قرارگیری یکسان دریچهها و فاصله ثابت بین آنها، بهتر است عملیات مذکور در مخزن با رسوبات با قطر متوسط کمتر، تراز انباشت بیشتر و تعداد دریچههای عمقی فعال بیشتر انجام گردد.

قابل توجه است، با توجه به دخیل بودن عوامل متعدد بر پدیده رسوبزدایی از مخازن، نتایج مقاله حاضر برای شبیهسازی حاضر بوده و برای تعمیم آن به مدلهای دیگر، نیازمند تحقیقات متعددی میباشد.

#### 6- مراجع

- Ahadpour Dodaran A, Kil Park S, Mardashti A, Noshadi M, "Investigation of dimension changes in under pressure hydraulic sediment flushing cavity of storage dams under effect of localized vibrations in sediment layers", International Journal of Ocean System Engineering, 2012, 2 (2), 71-81.
- Althaus J, Cesare G, Schleiss A, "Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet-Induced Flow", Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 41 (2), 04014078-1-04014078-9.
- Ahn J, Yang CT, Boyd PM, Pridal DB, Remus JSI, "Numerical modeling of sediment flushing from lewis and clark lake", International Journal of Sediment Research, 2013, 28 (2), 182-193.
- Castillo LG, Carrillo JM, Alvarez MA, "Complementary methods for determining the sedimentation and flushing in a reservoir", Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 2015, 05015004,1-10.
- Chaudhary HP, Neena Isaac, Tayade S B, Boshekar VV, "Integrated 1D and 2D numerical model simulations for flushing of sediment from reservoirs", ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2018. https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1423580
- Emamgholizadeh S, Bina M, Fathi-Moghadam M, Ghomeyshi M, "Investigation and evolution of the pressure flushing through storage reservoir", ARPN Journal of Engineering and Applied sciences, 2006, 1 (4), 7-16.
- Emamgholizadeh S, Fathi-Moghdam M, "Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs", Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19, 674-681.
- Esmaeili T, Sumi Tetsuya A, Kantoush S, Kubota Y, Haun S, Rüther N, "Three-dimensional numerical study of

- Liu J, Minami S, Otsuki H, Liu B, Ashida K, "Prediction of concerted sediment flushing", Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130 (11), 1089-1096.
- Madadi MR, Rahimpour M, Qaderi K, "Improving the pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study", Water Resource Management.
- Ministry of Energy, "Guide to sedimentation and desedimentation studies of dam reservoirs", Publication No. 589, Deputy President for Strategic Planning and Supervision, 2012.
- Modirzadeh SO, Zarati RR, "Investigation and comparison of the formulas presented for calculating the volume and dimensions of the cone resulting from hydraulic pressure washing", 16<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Technology and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, 2017.
- Moridi A, Yazdi J, "Sediment flushing of reservoirs under environmental considerations", Water Resources Management, 2017, 31 (6), 1899-1914.
- Olsen N, "Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs", Hydraulic Research, 1999, 37 (1), 3-16.
- Peykani P, Daryaee M, Kashefipour SM, "Effect of using single square pile at upstream of the orifice on pressurized flushing", Journal of Hydraulics, 2020, 15 (1), 61-74.
- Planning and Budget Organization, "Guide to the application of mathematical models in sedimentation and de-sedimentation of dam reservoirs", Technical Deputy, Infrastructure and Production Affairs, Technical and Executive System Affairs, Ministry of Energy, Office of Water Standards and Projects, 2017.
- Rasouli A, Bordbar A, Heidarnejad M, Kamanbedast A, Masjedi A, "Effect the kind of sediments on Scour Cone in Pressure Flushing", Iranian Journal of Watershed Management Science, 2019, 13 (44), 83-89.
- Rehman H, Chaudhry MA, Naeem UA, Hashimi HN, "Performance evaluation of 1-d numerical model hec-ras towards modeling sediment depositions and sediment flushing operations for the reservoirs", Environ Monit Assess, 2018, 190 (433), 1-18.
- Sawadogo OR, Basson G, Schneiderbauer S, "Physical and coupled fully three-dimensional numerical modelling of pressurized bottom outlet flushing process in reservoirs", International Journal of Sediment Research, 2019, 34, 461-474.
- Shamsi Lahijani A, Pourbakhshian S, "Discharging sediments deposited in dam reservoirs by sediment suspension method", 16<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Technology and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, 2017.
- Tofigh S, Valisamani JM, Ayyoubzadeh SA, "Pressure flushing with expanding bottom outlet channel within dam reservoir", Modares Civil Engineering Journal, 2015, 15 (2), 127-136.
- Wen Shen H, "Flushing sediment through reservoirs", Journal of Hydraulic Research, 1999, 37 (6), 743-758.
- Sawadogo OR, Basson G, Schneiderbauer S, "Physical and coupled fully three-dimensional numerical

free-flow sediment flushing to increase the flushing efficiency: a case-study reservoir in Japan", Water Journal-MDPİ, (900), 2017.

- Eghbali S, Baharvand Y, "Advantages and disadvantages of reservoir dam de-sedimentation methods", Journal of Science and Engineering Elites, 2017, 2 (2), 410-416.
- Fan J, Morris LG, "Reservoirs sedimentation 2: reservoir desiltation and long-term storage capacity", Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118 (3), 370-384.
- Fathi-Moghadam M, Emamgholizadeh S, Bina M, Ghomeshi M, "Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment", Hydraulic Research, 2010, 48 (4), 509-514.
- FLOW-3D, version 9.3., Flow Science, Inc. 2008.
- Haghjouyi H, Rahimpour M, Qaderi K, Sameh A, "Experimental study on the effect of bottomless structure in front of a bottom outlet on a sediment flushing cone", International Journal of Sediment Research, 2020, 36 (3), 335-347.
- Ghasemzadeh F, "Simulation of Hydraulic Problems in FLOW-3D", 3<sup>rd</sup> edition, Noavar Publications, 2018.
- Hassanzadeh Y, "Hydraulics of Reservoir sediment. First edition", Ministry of Energy, National Committee of Large Dams of Iran, 2010.
- Hassanzadeh Y, "The removal of reservoir sediment", Water International, 1995, 20 (3), 151-154.
- Hassanzadeh Y, "Hydraulics of sediment transport, book chapter in Hydrodynamics: Theory and Model", Intech, 2012, 23-58.
- Haun S, Olsen NRB, "Three-dimensional numerical modelling of reservoir flushing in prototype scale", International Journal of River Basin Management, 2012, 10 (4), 341-349.
- Idrees MB, Lee JB, Kim D, Kim TW, "Complementary modeling approach for estimating sedimentation and hydraulic flushing parameters using artificial neural networks and RESCON2 Model", KSCE Journal of Civil Engineering, 2021.
- Ji U, Julien PY, Park SK, "Sediment flushing at the nakdong river estuary barrage", Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 2011, 137 (11), 1522-1535.
- Kamble SA, Kunjeer PS, Sureshkumar B, Neena Isaac, "Hydraulic model studies for estimating scour cone development during pressure flushing of reservoirs", ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2017.
- Karimi, S. and Mahtabi G, "Effect of radial arrangement of submerged vanes in increasing the flushing efficiency of dam reservoir", Water and Soil Science, 2018, 28 (2), 43-56.
- Khosronejad A, Ashrafzadeh A, Vazifedoust M, "Numerical modeling of flushing process in Dez dam reservoir by HR Wallingford method", World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers ASCE, 2009, 3036-3042.
- Khosronejad A, Parvaresh Rizi A, "Sediment Mechanics in Open Waterways and Dam Reservoirs", 2<sup>nd</sup> edition, Noavar Publications, 2018.
- Lai JS, Shen HW, "Flushing sediment through reservoirs", Journal of Hydraulic Research, 1996, 34 (2), 237-255.

modelling of pressurized bottom outlet flushing process in reservoirs", International Journal of Sediment Research, 2019, 34, 461-474.

Wen Shen H, "Flushing sediment through reservoirs", Journal of Hydraulic Research, 1999, 37 (6), 743-758.