

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Modeling of Sediment Washing (Flushing) in Dams (Case Study: Sefidrood Dam)

M. Adineh¹, M. Shafaei Bajestan^{2*} and H. Ghodousi³

1- PhD Student in Civil Engineering, Islamic Azad University, Kish International Branch.

2* - Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(m-shafaeibajestan@scu.ac.ir).

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Zanjan.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 November 2021

Revised: 22 June 2022

Accepted: 26 June 2022

Keywords:

Sediment Washing, Dam
Reservoirs, 3D Software.

TO CITE THIS ARTICLE:

Adineh, M., Shafaei Bajestan, M., Ghodousi, H. (2023). 'Numerical Modeling of Sediment Washing (Flushing) in Dams (Case Study: Sefidrood Dam)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(3), pp. 57-68. doi: 10.22055/jise.2023.39236.2003.

Introduction

In this research, the sediment washing operation of the Sefidrood Dam reservoir has been simulated using a Numerical Flow 3D model along with two turbulence models, RNG and LES. The results of case studies performed on the Sefidrood Dam reservoir in 2004 have been validated. To simulate, an area of the reservoir with an approximate length of 700 meters and also the dam wall meshed in the form of 2 mesh blocks 1 and 2. Mesh block 1 was considered to include the dam wall, the area close to the dam wall, and the lower Gates. The dam was considered to be a solid type, which is unchangeable. Still, the geometry of the reservoir bed was defined as sediment because it changes with the movement of the flow.

The results show that near the lower dischargers of the dam, the maximum amount of sediment washing up to the reservoir bed is conical. The high values of the explanation coefficient (R²) and the low values of the percentage of predictive error of the numerical model indicate the acceptable results of the Flow 3D model with the LES simulator in the flushing modeling of Sefidrood Dam. A comparison of the results suggests that the LES turbulence model has a better performance in estimating the maximum scour depth than the RNG turbulence model, and the results are closer to the flushing results performed in 2004.

Methodology

In this research, the Sefidrood dam is considered a case study. Sefidrood dam is a concrete type located near Manjil city in Gilan province in Iran. This dam has a height of 106 meters and a wall length of 425 meters. It was constructed and put into operation in 1962, aiming at storing water for agriculture in Gilan plain, drinking water, and energy production.

The normal figure of the dam is equal to 271.65 meters above sea level, and the storage volume of the reservoir in this figure is equal to 1760 million cubic meters. Sefidrood dam was designed and dewatered with an initial volume of about 1800 million cubic meters and a useful life of 100 years.

Sefidrood Dam is one of the most sedimentary dams in the world. Now more than half of the dam capacity is filled with sediments. This amount of sedimentation in the Sefidrood Dam is 11 times more than that in USA reservoir dams (Shafai Bajestan, 2012).

In this simulation, a flushing operation at the height of 234.6 meters, i.e., the height that Shas operation was performed in this dam in 2004, was performed using Flow 3D software with two turbulence methods, RNG and LES, and the results were compared with flushing operation performed in 2004.

Flow 3D is a 3D model developed by the Flow Science company. Flow 3D is a non-hydrostatic finite difference model that simultaneously solves three-dimensional Navier-Stokes equations and continuity (Flow 3D Help and Flow Science). To simulate the sediment washing of the Sefidrood Dam reservoir in a Flow 3D software environment, five steps of Display, Analyze, Simulate, Model Setup, and Navigator must be performed, respectively. To simulate the flushing operation of the Sefidrood Dam with Flow 3D software, a range of the reservoir and the dam's wall meshed in the form of 2 mesh blocks 1 and 2.

After entering all the required information into the software, including flow boundary conditions, such as Reservoir water height, inlet and outlet flow at the simulation start, water temperature, gravity acceleration, simulation time, etc., Flow 3D software solved hydraulic flow equations known as Navier-Stokes equations (which include the continuity equation and three momentum equations in three different directions) inside each cell in different simulation time steps defined in the software.

Result

The results show that near the lower gates of the dam, the maximum amount of sediment washing up to the reservoir bed is done in a conical shape. The general shape of the conical area at the beginning of the sedimentation process consists of two separate and separable parts. The first part consists of a central submerged cavity. The place of formation of this cavity is near the model wall and along the lower valve, which causes the discharge of sediment by gravity. The second part consists of a medium slope that leads to a smooth surface due to the flow's general movement towards the central cavity. In pressure washing operation, Sediment washing is mainly done around the gates. To reach the sediment washing channel along the reservoir and drain a large volume of sediment, we must reach the river flow, called free-flow flushing.

Conclusion

Comparing the modeling results with the RNG turbulence model with the flushing results of 2004, the RNG model up to a distance of 180 meters from the dam wall shows more sediment washing than the flushing of 2004. The reason could be the change in the grain size of the sediments inside the reservoir and the size of the sediments and their greater adhesion in the area close to the dam wall in the 2004 operation. However, in the range of 180 meters to 500 meters from the dam wall, sediment washing in 2004 discharged more sediments from the reservoir than the RNG model.

Comparing the results of LES model with the results of 2004, LES model up to 120 meters from the dam wall shows more sediment washing than in 2004. At a distance of 120 meters to 300 meters from the dam wall, the sediment washing of the year 2004 has discharged more sediments from the reservoir than the LES model. At a distance of 300 meters to 500 meters from the dam wall, The results of the LES model are almost equal to the results of flushing in 2004. The results also show that the LES turbulence model has higher accuracy compared to the RNG turbulence model, and the results are closer to the flushing results performed in 2004.

According to the results shown in Table 5, high values of the coefficient of explanation (R^2) and low values of the percentage error of the numerical model predict the acceptable results of the Flow 3D model with LES simulator in flushing modeling of the Sefidrood dam. A comparison of the results shows that the LES turbulence model has a better performance in estimating the maximum

scour depth than the RNG turbulence model, and the results are closer to the flushing results performed in 2004.

Acknowledgments

The authors of the article express their gratitude to the regional water organization of Tehran province and the regional water organization of Gilan province for providing statistics and information.

References

- 1-Shafai Bajestan, M., 2012. *Guide to sedimentation and descaling studies of dam reservoirs*, Publication No. 589, (In Persian).



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مدل سازی عددی رسوب شویی (فلاشینگ) در سدها (مطالعه موردی سد سفیدرود)

مصطفی آدینه^۱، محمود شفاعی بجستان^۲ و حسام قدوسی^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بین المللی کیش.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
m-shafaeibejestan@scu.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

چکیده

در این تحقیق عملیات رسوب شویی مخزن سد سفیدرود با استفاده از مدل عددی Flow 3D با دو مدل آشفتگی LES و RNG شبیه سازی شده و با نتایج مطالعه های موردی انجام گرفته روی مخزن سد سفیدرود در سال ۱۳۸۳ صحت سنجی شده است. به منظور شبیه سازی، محدوده ای از مخزن به طول تقریبی ۷۰+ متر و همچنین دیواره سد در قالب دو مش بلاک (Mesh block) یک و دو مش بندی گردید. مش بلاک یک شامل دیواره سد و همچنین محدوده نزدیک به دیواره سد و همچنین درجه های تحتانی در نظر گرفته شد. در این محدوده به خاطر وجود تغییرات گرادیان سرعت جریان، تعداد سلول ها بیشتر در نظر گرفته شده تا محاسبات دقت بیشتری داشته باشند. دیواره سد از جنس Solid در نظر گرفته شد که غیر قابل تغییر می باشد ولی هندسه بستر مخزن، رسوبی Sediment تعریف گردید زیرا با حرکت جریان تغییر می کند. نتایج نشان می دهد که در نزدیکی تخلیه کننده های تحتانی سد مقدار حداکثر رسوب شویی تا بستر مخزن به صورت مخروطی شکل انجام می شود. مقادیر بالای ضریب تبیین $R^2=0/832$ و مقادیر پایین درصد خطای پیش بینی مدل عددی و درصد مربعات خطا، $RMSE=0/57$ و $MAE=0/454$ بیان گر نتایج قابل قبول مدل Flow 3D با شبیه ساز LES در مدل سازی فلاشینگ سد سفید رود می باشد. مقایسه نتایج بیان گر آن است که مدل آشفتگی LES در برآورد حداکثر عمق آبشستگی عملکرد بهتری نسبت به مدل آشفتگی RNG دارد و نتایج حاصل از آن به نتایج فلاشینگ انجام شده در سال ۱۳۸۳ نزدیک تر است.

کلید واژه ها: رسوب زدایی، مخازن سد، نرم افزار سه بعدی.

مقدمه

مخازن از دست رفته، نیاز به ساخت مخازن جدید می باشد. در جدول (۱) تقاضا برای احداث مخازن در نقاط مختلف جهان نشان داده شده است (Fan and Morris, 1992). در همین راستا، تخلیه مخزن به وسیله رسوب شویی، ساده ترین و ارزان ترین روش رسوب زدایی مخازن در سدها می باشد. هر چند که این روش به دلیل برخی محدودیت ها به طور وسیع مورد استفاده قرار نمی گیرد. این محدودیت ها شامل حجم زیاد آب مورد نیاز، لزوم پایین آوردن آب مخزن در دوره های مهم و عدم وجود درجه های مناسب در ساختار برخی از سدها است (عدم پیش بینی درجه های تحتانی در ترازهای مورد نیاز). چنانچه این محدودیت ها وجود نداشته باشند، تخلیه مخزن به وسیله رسوب شویی امکان پذیر است. به همین دلیل اخیراً علاقه مندی به تخلیه رسوب از مخازن سدها به روش فلاشینگ توسعه یافته است. در جدول (۲) مثال هایی از مخازن با رسوب شویی موفق نشان داده شده است.

از سال ۱۹۸۰ تاکنون مطالعه های عددی و تحلیلی متعددی به منظور شبیه سازی فرآیند رسوب شویی انجام گرفته است. Fan و Morris (1992) از مدل Hec-6 به منظور بررسی تأثیر عملکرد

در ایران مسأله رسوب گذاری در مخازن سدها دارای اهمیت زیادی است. در حدود ۷۰ درصد از منابع آبی کشور ایران را آب های سطحی تشکیل می دهند و به دلیل عدم هماهنگی زمانی بین آبدهی حوضه ها و مصارف، نیاز به مخازن ذخیره آب در ایران کاملاً ضروری است. از طرفی عدم انجام اقدامات مؤثر آبخیزداری در حد کافی باعث شده است که فرسایش از حوضه های آبریز سدها از حد مجاز بیشتر باشد و باعث شده است که رسوب گذاری در سدها افزایش یابد.

براساس مطالعه های انجام شده حدود یک درصد از ظرفیت سدهای جهان سالانه به واسطه رسوب گذاری از دست می رود (Brandt, 2000). این مقدار برابر با ظرفیت ۳۰۰ سد بزرگ است. به عبارت دیگر باید سالانه در سراسر جهان ۳۰۰ سد بزرگ ساخته شود تا بتوان جبران رسوب گذاری مخازن را نمود. در ایران نیز به طور متوسط سالانه یک درصد از حجم کل مخازن یعنی حدود ۱۸۰ میلیون متر مکعب پر از رسوب می گردد و در نتیجه به منظور تأمین نیازهای آبی جمعیت و جبران بخشی از حجم

پایدار حفره آب شستگی برای رسوبات چسبنده به مراتب تندتر از شیب پایدار رسوبات غیر چسبنده می‌باشد.

رسوب‌شویی به‌طور گسترده در بازیافت حجم ذخیره مخازن کاربرد داشته است Agazamani (2013) با مطالعه مدیریت رسوب‌شویی در مخازن سدها به کمک GIS و Flow 3D نشان داد که روش رسوب‌شویی تأثیر موضعی داشته و معمولاً برای خارج کردن رسوبات نهشته شده اطراف ورودی آبیگرها می‌تواند به کار رود. Abdipor et al (2016) برای افزایش رسوب‌شویی و زدودن رسوبات نزدیک سد به خصوص رسوبات جلوی دهانه آبیگر نیروگاه‌ها از جت، در جلوی دهانه خروجی سد استفاده کردند. در آزمایش‌ها از پنج عدد جت با سه سرعت مختلف و سه قطر نازل مختلف در دو تراز تخلیه‌کننده استفاده شده که نتایج نشان می‌دهند که از بین پارامترهای موجود، سرعت جت بیشترین تأثیر را در رسوب‌شویی دارد. Rashidzadeh و Ghadampour (2017) عملیات فلاشینگ آزاد را با استفاده از مدل آزمایشگاهی، در یک کانال و در دو حالت، اولی با یک دریچه به عرض پنج سانتی‌متر و دیگری با دو دریچه به عرض پنج سانتی‌متر با دبی‌های ۱۰،۱۶ و ۲۰ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی و تعداد دریچه‌ها حجم آبشستگی افزایش یافته و با حرکت از سمت ابتدای چاله آبشستگی به سمت انتها، پروفیل سرعت مشابه تغییرات سرعت در کانال‌های جریان آزاد می‌شود. Shahriari, et al (2020) تأثیر کارگذاری سازه T شکل به‌عنوان یک روش جدید در افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با سه دبی ۱۷/۱۴، ۳۸/۶، ۳۴/۸ لیتر بر ثانیه انجام شدند.

دریچه‌های مختلف در حین سیلاب‌های مخزن Loiza استفاده کردند. Olsen (1999) از یک مدل عددی دویعدی برای شبیه‌سازی رسوب‌شویی مخازن استفاده کرد. او اظهار داشت که اغلب برای ساده‌سازی‌های انجام گرفته روی مدل‌های عددی معقول است. Chang et al (2004) از الگوریتم ژنتیک برای تعیین و بهینه‌سازی منحنی فرمان و طرح رسوب‌شویی در یک مخزن استفاده نمودند. Samadi Brojeni (2002) با استفاده از مدل عددی Mike11 تأثیر رسوب‌شویی سد دز بر کاهش ظرفیت مخزن سد تنظیمی دزفول را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از مدل Mike11 رفتار جریان و رسوب رودخانه دز در زمان انجام عملیات رسوب‌شویی سد دز شبیه‌سازی گردید تا تأثیر سد تنظیمی دزفول در تله اندازی رسوبات ارزیابی شود. Sadegzadeh و Alami (2006) به بررسی تأثیر رها سازی رسوبات سدهای مخزنی بر مورفولوژی رودخانه پایین دست با استفاده از مدل Gstars o.3 در رودخانه سفیدرود پرداختند. در این مطالعه تغییرات مورفولوژیک رودخانه سفیدرود تحت تأثیر عملیات شاس سال ۱۳۶۷، با استفاده از مدل مذکور شبیه‌سازی گردید و با مورفولوژی پیش‌بینی شده تئوریک در اثر رسوب‌زدایی مقایسه گردید. در زمینه رسوب‌زدایی تحت فشار نیز مطالعه‌هایی در سایر نقاط جهان انجام گرفته است. برای مثال Jin (1992) خاطر نشان کرد که ماکزیمم عمق آب شستگی به‌طور مستقیم متناسب با عدد فرود ذره بوده و شیب بستر مخروط آب شستگی در امتداد محور طولی در مقایسه با شیب عرضی رسوب در جهت عمود بر محور خروجی تخلیه‌کننده، کوچک‌تر می‌باشد. (2000) Brandt با مطالعه روی مخازن سدهای سوییس نشان داد شیب

جدول ۱- تقاضا برای احداث مخازن در مناطق مختلف جهان

Table 1- Demand for reservoirs in different parts of the world

Requested tank volume(Cubic Kilometers)			egion
2020 to 2030	2010 to 2020	2000 to 2010	
54	51	49	Europe
424	495	467	Central and South America
248	203	167	Africa
213	281	315	Asia and Oceania
939	1032	998	Total

جدول ۲- مثال‌هایی از مخازن با رسوب‌شویی موفق (Atkinson,1996)

Table 2- Examples of reservoir with successful sediment washing (Atkinson,1996)

Reservoir	Country	Reference
Baira	India	Jaggy and Kashyep(1984)
Gebidem	Switzerland	Dawans et al(1982)
Gmund	Austria	Rienossl and Schnelle(1982)
Hengshan	China	IRTCES(1985)
Honglingjin	China	IRTCES(1985)
Mangahao	New zealand	Joweti(1984)
Naodehal	China	IRTCES(1985)
Palagneda	Switzerland	Swiss Nat.Committee on Large Dams(1982)
Santo Domingo	Venezuela	Krumdike and chamot(1979)

باعث گردید ۳۰ درصد از حجم مفید مخزن کاهش یابد. در شکل (۱) وضعیت مخزن سد سفیدرود نمایش داده شده است که دریچه‌های تحتانی کاملاً در زیر رسوبات مدفون گردیده است، به طوری که پیشانی رسوبات مخزن در فاصله ۳۰۰ متری از بدنه سد، بالاتر از ارتفاع ورودی دریچه‌های نیروگاه که رقوم آستانه آن‌ها ۲۱۰/۱۰ متر می‌باشد، قرار دارد که با در نظر گرفتن کف دریچه‌های تحتانی (۱۹۱/۳۰ متر)، ارتفاع رسوبات به حدود ۲۰ تا ۲۵ متر می‌رسد. سد سفیدرود یکی از رسوب‌گیرترین سدهای جهان است. اکنون بیش از نیمی از ظرفیت سد را رسوبات پر کرده است. این مقدار رسوب‌گذاری در سد سفیدرود ۱۱ برابر رسوب‌گذاری سدهای مخزنی آمریکا است (Shafai Bajestan., 2012). به همین دلیل شبیه‌سازی عددی رسوب‌زدایی و رسوب‌شویی مخزن در مرحله‌ی بهره‌برداری، کمک بسیاری به مدیریت بهتر بهره‌برداری خواهد نمود.

رسوب‌زدایی هیدرولیکی ویا عملیات شاس (به زبان فرانسه) به عملیاتی اطلاق می‌شود که با باز کردن تخلیه‌کننده‌های تحتانی در کف یا رقوم پایین‌تر رسوبات نهشته شده در بستر مخزن سد در اثر فرسایش، کنده شده و به همراه جریان آب از مخزن خارج می‌شود. در این شبیه‌سازی عملیات فلاشینگ را در ارتفاع ۲۳۴۶ متر یعنی ارتفاعی که در سال ۱۳۸۳ عملیات شاس در این سد انجام شده است با دبی متوسط ورودی سالانه که مجموع دبی متوسط ورودی سالانه رودخانه قزل اوزن و رودخانه شاهرود می‌باشد (دبی متوسط از سال ۴۱ تا ۹۴) به کمک نرم‌افزار Flow 3d با دو روش آشفتگی RNG و LES انجام شده و نتایج با عملیات فلاشینگ انجام شده در سال ۱۳۸۳ مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

در نرم‌افزار Flow-3D پنج مدل آشفتگی وجود دارد: ۱- مدل طول اختلاط پراختل ۲- مدل تک معادله‌ای ۳- مدل دو معادله‌ای k-e ۴- مدل دو معادله‌ای RNG ۵- مدل شبیه‌ساز گردابه‌های بزرگ LES. مدل RNG از معادله‌های مشابه با مدل k-e استفاده می‌کند. با این حال، ثابت‌های معادله که به لحاظ تجربی در مدل استاندارد وجود دارد، در معادله‌های RNG به صورت مشتقات صریح به کار برده شده است. در حالت کلی، مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به مدل استاندارد k-e دارد. به‌طور خاص، مدل RNG برای توصیف جریان‌های با آشفتگی کم و جریان‌هایی با مناطق برشی قوی عملکرد دقیق‌تری دارد. در مدل LES، جریان به دو بخش گردابه‌های بزرگ (large eddy) و گردابه‌های کوچک (small eddy) تقسیم می‌شود. برای گردابه‌های بزرگ حل انجام می‌شود در حالیکه برای گردابه‌های کوچک مدل‌سازی صورت می‌گیرد. با توجه به نوع جریان موجود در داخل سد و در محدوده دریچه‌های تحتانی از دو مدل آشفتگی RNG و LES برای انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار Flow 3D استفاده گردید.

نتایج نشان داد که کارگذاری سازه T شکل با ابعاد ذکر شده، حجم مخروط رسوب‌شویی را تا حد قابل توجهی برای هر سه دبی افزایش داد، به طوری که در دبی ۳۴/۸ لیتر بر ثانیه حجم مخروط رسوب‌شویی نسبت به حالت شاهد ۱۳۵۷ درصد افزایش یافت. بیشتر مطالعه‌های قبلی با کمک نرم‌افزارهای یک بعدی و دو بعدی انجام گرفته و از آنجایی که نرم‌افزارهای یک بعدی و دو بعدی توانایی تحلیل دقیق شرایط جریان در داخل مخازن سدها که به صورت سه بعدی و در جهات مختلف می‌باشند را ندارند و همچنین باتوجه به مقیاس سد که جز سازه‌های با مقیاس بسیار بزرگ محسوب می‌شود، امکان مدل‌سازی آزمایشگاهی با مقیاس واقعی وجود ندارد. به همین دلیل و به خاطر اهمیت موضوع، در این تحقیق نرم‌افزار سه بعدی Flow 3D برای مدل‌سازی عملیات فلاشینگ با مقیاس واقعی سد سفیدرود، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی عددی اگر دقت کافی را داشته باشد، می‌تواند به ما کمک کند که سناریوهای مختلف را در عملیات فلاشینگ بررسی نماییم و مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار سه بعدی Flow 3D این امکان را به ما می‌دهد که مخزن سد را با مقیاس واقعی مدل کنیم و عملیات فلاشینگ را با دبی‌های مختلف و در شرایط متفاوت هیدرولیکی، به‌عنوان مثال باز یا بسته بودن تعدادی از دریچه‌های تخلیه تحتانی در دبی‌های خروجی متفاوت یا استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف هنگام عملیات فلاشینگ، مدل کنیم. نتایج به دست آمده با نتایج مطالعه‌های موردی انجام گرفته در سال ۱۳۸۳ صحت‌سنجی و مقایسه شده و بهترین شرایط فلاشینگ بررسی و تعیین شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق مدل‌سازی سد سفیدرود به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. سد سفیدرود از نوع بتنی پشت بنددار بوده و در نزدیکی شهرستان منجیل در استان گیلان واقع شده است. این سد دارای ۱۰۶ متر ارتفاع و طول تاج ۴۲۵ متر می‌باشد و با هدف ذخیره آب برای کشاورزی دشت گیلان، آب شرب و تولید انرژی، احداث و در سال ۱۳۴۱ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. رقوم نرمال سد برابر با ۲۷۱/۶۵ متر از سطح دریا و حجم ذخیره مخزن در این رقوم برابر با ۱۷۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. سد سفیدرود با حجم اولیه حدود ۱۸۰۰ میلیون متر مکعب و عمر مفید ۱۰۰ ساله طراحی و آبیگری شد. این سد بعد از ۱۷ سال بهره‌برداری به علت عدم وجود پوشش گیاهی در حوضه آبریز و ریزش باران‌های فصلی و متعاقب آن وقوع سیلاب‌های سهمگین و همچنین عدم استفاده از تخلیه‌کننده‌های تحتانی در مواقع سیلابی و سیاست استفاده از تولید نیروی برق، حجم عظیمی از رسوب (۴۶ میلیون تن در سال) وارد مخزن سد شد که



Fig. 1- Accumulated sediments behind the wall of Sefidrood dam

شکل ۱- رسوبات انباشته شده در پشت دیواره سد سفیدرود

به منظور شبیه‌سازی رسوب‌شویی مخزن سد سفیدرود در محیط نرم‌افزار Flow 3D باید به ترتیب پنج مرحله Display, Analyze, Simulate, Setup, Navigator انجام شود. ۱- (Navigator): در این بخش می‌توان در یک زمان چندین شبیه‌سازی، شامل مدل‌های مختلف را راه اندازی و مورد حل قرار داد و نتایج پردازش آن‌ها را مشاهده نمود. ۲- (Model setup): در این قسمت کلیه اطلاعات لازم برای مدل‌سازی یک شبیه‌سازی به نرم‌افزار داده می‌شود. مانند: ۱-۲ بخش (General): شامل اطلاعاتی مثل زمان اتمام محاسبات (Finish time).

۲-۲ بخش (Physics): که ویژگی‌های مختلف سیال مانند لزجت (Viscosity)، شتاب ثقل (Gravity)، برش دیواره (Wall shear) و... به نرم‌افزار وارد می‌شود.

۳-۲ بخش (Fluids): در این قسمت مقادیر عددی خواص فیزیکی سیال، نظیر: جرم حجمی (Density)، کشش سطحی (Surface Tension) و... به نرم‌افزار وارد می‌شود.

۴-۲ بخش شبکه‌بندی و هندسه مخزن و بدنه سد سفیدرود (Meshing and Geometry)

هندسه که شامل توپوگرافی مخزن، موقعیت و ابعاد سد، دریچه‌های تختانی، سرریزها و خروجی‌های میانی، دی‌های روزانه آب ورودی و خروجی مخزن، دی‌های روزانه رسوب ورودی و خروجی مخزن، دانه‌بندی ذرات رسوب، توزیع و دانه‌بندی روی بستر و ترازهای روزانه آب و در موقع فلاشینگ، ضرایب زبری بستر و بدنه مخزن سد می‌باشند را در محیط GIS جمع‌آوری کرده و سپس به نرم‌افزار Flow 3D وارد می‌کنیم. اولین مرحله، انتقال توپوگرافی مخزن به نرم‌افزار Flow 3D است.

این توپوگرافی در نرم‌افزار GIS به صورت مدل ارتفاع رقمی تهیه و تنظیم می‌شود و به فرمت STL در می‌آید تا قابلیت وارد شدن به نرم‌افزار Flow 3D را داشته باشد.

معرفی نرم‌افزار Flow 3D

Flow 3D یک مدل سه بعدی می‌باشد که در شرکت Flow Science توسعه داده شده است. Flow 3D یک مدل اختلاف محدود غیر هیدرواستاتیکی می‌باشد که معادله‌های ناویراستوکس سه‌بعدی و پیوستگی را به صورت همزمان حل می‌کند. معادله‌های حرکت سیال شامل معادله‌های پیوستگی و مومنوم است که مدل Flow 3D نیز همانند تمام برنامه‌ها از حل آن‌ها برای محاسبه‌های هیدرولیکی جریان استفاده می‌کند. رابطه (۱) معادله پیوستگی و روابط ۲ تا ۴ معادله‌های مومنوم در مختصات کارتزین را نشان می‌دهند.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \quad (4)$$

این برنامه برای جریان‌های سه‌بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده می‌باشند کاربرد دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی مستطیلی استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار از دو روش برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است. روش اول روش حجم سیال است که برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش دوم، روش کسر مساحت-حجم مانع نام دارد که برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب، مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد. (Flow 3D Help and Flow Science).

جدول ۳- ابعاد و اندازه سلول ها در مش بلاک ۱

Table 3- Dimensions and sizes of cells in mesh block 1

	X direction	Y direction	Z direction
Total number	117	36	80
Maximum cell size(m)	5.01	5	0.87
Total number of real cells in mesh block 1		336960	

جدول ۴- ابعاد و اندازه سلول ها در مش بلاک ۲

Table 4- Dimensions and sizes of cells in mesh block 2

	X direction	Y direction	Z direction
Total number	98	59	40
Maximum cell size(m)	10.02	9.93	1.75
Total number of real cells in mesh block 2		231280	

نرم افزار Auto Cad سه بعدی طراحی شده و به محیط GIS اضافه شده است. بعد از مش بندی مرحله بعدی مشخص نمودن شرایط مرزی و شرایط اولیه جریان می باشد. در این مرحله ارتفاع آب در زمان شروع شبیه سازی $t=0$ در داخل مش بلاک ها در قسمت show initial window تنظیم می شود و همچنین دبی ورودی و ارتفاع آب هنگام ورود به داخل مش بلاک ها در قسمت Show mesh boundaries تعریف می شود.

پس از وارد کردن تمام اطلاعات مورد نیاز به نرم افزار از جمله شرایط مرزی جریان، مانند ارتفاع آب مخزن و دبی ورودی و دبی خروجی مخزن در زمان شروع شبیه سازی، دمای آب، شتاب ثقل، زمان شبیه سازی و... نرم افزار Flow 3D معادله های هیدرولیکی جریان که معروف به معادله های ناپیرا استوکس می باشند (که شامل معادله پیوستگی و سه معادله مومنوم در سه راستای مختلف است) را در داخل هر یک از سلول ها در گام های زمانی مختلف شبیه سازی که در نرم افزار تعریف می شود حل کرده و نتایج را آنالیز می کند. عملیات شبیه سازی فلاشینگ در ارتفاع ۲۳۴.۶ متر یعنی ارتفاعی که در سال ۱۳۸۳ عملیات شاس در این سد انجام شده است با دبی متوسط ورودی سالانه که مجموع دبی متوسط ورودی سالانه رودخانه قزل اوزن و رودخانه شاهرود می باشد به کمک نرم افزار Flow 3D شبیه سازی می گردد و سپس نتایج با عملیات فلاشینگ انجام شده در سال ۱۳۸۳ مقایسه و صحت سنجی می شود.

حجم رسوبات قبل از شروع عملیات شبیه سازی در نزدیکی دیواره سد به حدی است که سه دریچه تختانی سمت راست به کلی در داخل رسوبات مدفون بوده و بخشی از ارتفاع دریچه های تختانی سمت چپ نیز در داخل رسوبات قرار گرفته اند. در شکل (۲) شروع عملیات فلاشینگ با باز کردن دریچه های تختانی و خروج آب از درون دریچه ها نمایش داده شده است. بعد از عملیات فلاشینگ حجم زیادی از رسوبات از داخل مخزن خارج شده اند و چاله آبستگنی ایجاد شده است و دو دریچه تختانی سمت چپ و سه دریچه تختانی سمت راست به طور کامل از درون رسوبات خارج شده اند.

به منظور شبیه سازی عملیات فلاشینگ سد سفیدرود با نرم افزار Flow 3D محدوده ای از مخزن و همچنین دیواره سد در قالب دو مش بلاک (Mesh block) یک و دو مش بندی می گردد. دیواره سد و محدوده نزدیک به دیواره و تخلیه کننده های تختانی در مش بلاک یک قرار داده شده است. در این محدوده به خاطر وجود تغییرات گرادیان سرعت جریان، تعداد سلول ها بیشتر در نظر گرفته می شود تا محاسبات دقت بیشتری داشته باشند.

دیواره سد از جنس Solid در نظر گرفته می شود که غیر قابل تغییر می باشد ولی هندسه بستر مخزن، رسوبی Sediment تعریف می شود زیرا با حرکت جریان تغییر می کند و از جنس رسوباتی می باشد که در قسمت Physics نرم افزار تعریف می شود. شبکه مش بندی مستطیلی شکل مش بلاک یک که دیواره سد نیز در داخل آن قرار دارد با سلول های مستطیلی که تعداد و ابعاد آن ها در جدول (۳) نشان داده شده است تعریف می شود.

با توجه به جدول (۳) این مش بلاک ۵۸۵ متر طول و ۱۸۰ متر عرض دارد و ابعاد هر سلول (طول ۵ متر، عرض ۵ متر و ارتفاع ۰.۸۷۵ متر) و تعداد کل سلول ها ۳۳۶۹۶۰ عدد می باشد.

مش بلاک شماره دو که شامل بخشی از مخزن سد سفیدرود می باشد در جدول (۴) نشان داده شده است. این مش بلاک ۹۸۰ متر طول و ۵۸۵ متر عرض دارد. ابعاد هر سلول (طول ۱۰ متر، عرض ۹.۹۳ متر و ارتفاع هر سلول ۱.۷۵ متر) در نظر گرفته شده است. تعداد کل سلول های این مش بلاک ۲۳۱۲۸۰ عدد می باشد.

دریچه های تختانی سد نیز در قسمت Meshing and Geometry) به نرم افزار معرفی می گردند. در سد سفیدرود سه خروجی تختانی در سمت راست در تراز ۱۹۱.۳ متر با ظرفیت مجموع ۴۳۰ متر مکعب در ثانیه و دو خروجی تختانی در سمت چپ در تراز ۱۹۳.۸ متر با ظرفیت تخلیه مجموع ۵۳۰ متر مکعب در ثانیه طراحی و ساخته شده است. از آنجایی که جنس بدنه سد از نوع رسوبی نیست و در طی عملیات شبیه سازی رسوب شویی مخزن، بدنه سد بتنی نباید تغییر کند لازم است که هندسه بدنه سد به صورت جداگانه مدل سازی شده و با توپوگرافی مخزن ترکیب شود، که برای این کار بدنه هندسی سد با استفاده از

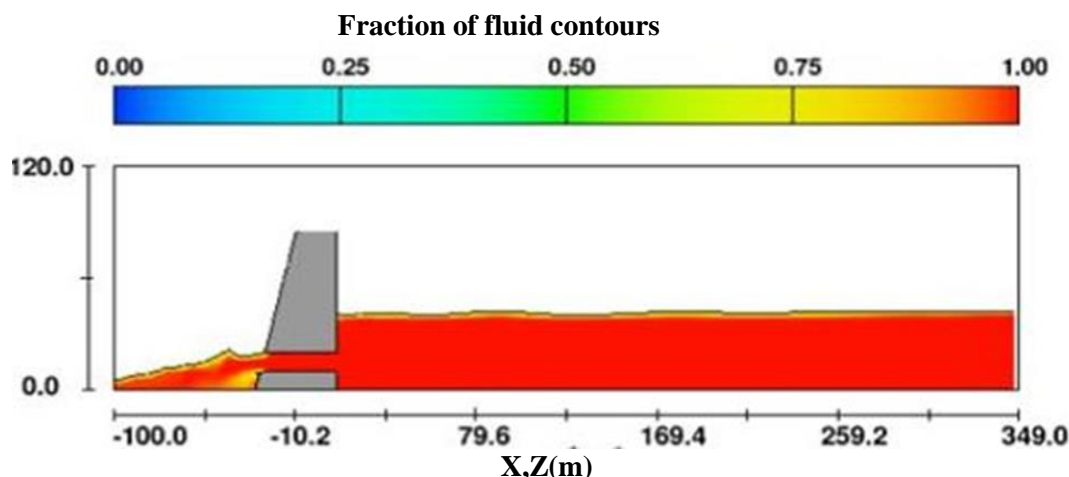


Fig. 2- Starting flushing operation by opening the lower gates
 شکل ۲- شروع عملیات فلاشینگ با باز کردن دریچه های تحتانی

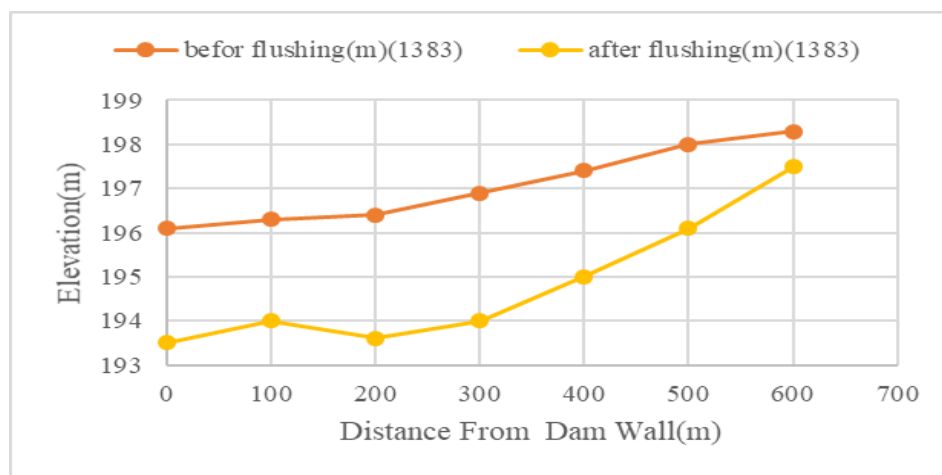


Fig. 3- Results of Flushing Modeling in the year 2004
 شکل ۳- نتایج مدل سازی فلاشینگ سال ۱۳۸۳

(۴) مشاهده می‌گردد که نتایج مدل‌سازی با مدل آشفتگی RNG با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ نزدیک هستند. در شکل (۵) نتایج مدل‌سازی با مدل آشفتگی LES با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی با مدل آشفتگی LES با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ بسیار نزدیک است. در شکل (۶) نتایج مدل‌های آشفتگی RNG و LES با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ باهم ارائه شده‌اند.

الگوی کلی جریان عبوری از محدوده‌ی دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی نشان داد که جریان ورودی در قسمت ابتدایی دریچه‌ها دچار همگرایی شده و سرعت در این منطقه افزایش چشم‌گیری دارد. به تدریج در طول مجرا بعد از ورودی، سرعت به حالت یکنواختی می‌رسد. در شکل (۳) نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود حجم زیادی از رسوبات تا فاصله ۶۰۰ متری از دیواره مخزن خارج شده‌اند. در شکل (۴) نتایج مدل‌سازی با مدل آشفتگی RNG با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ مقایسه شده است. با توجه به شکل

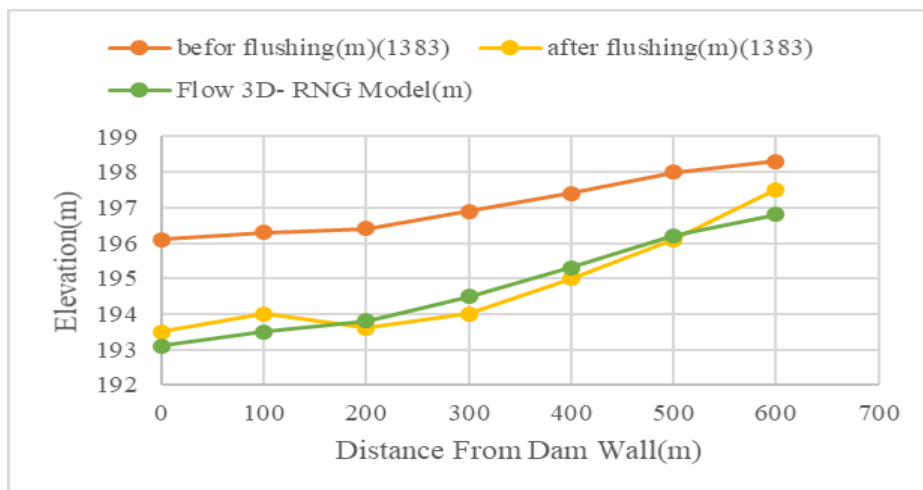


Fig. 4- Comparison of modeling results with RNG turbulence model with flushing results of 2004 year

شکل ۴- مقایسه نتایج مدل سازی با مدل آشفتگی RNG با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳

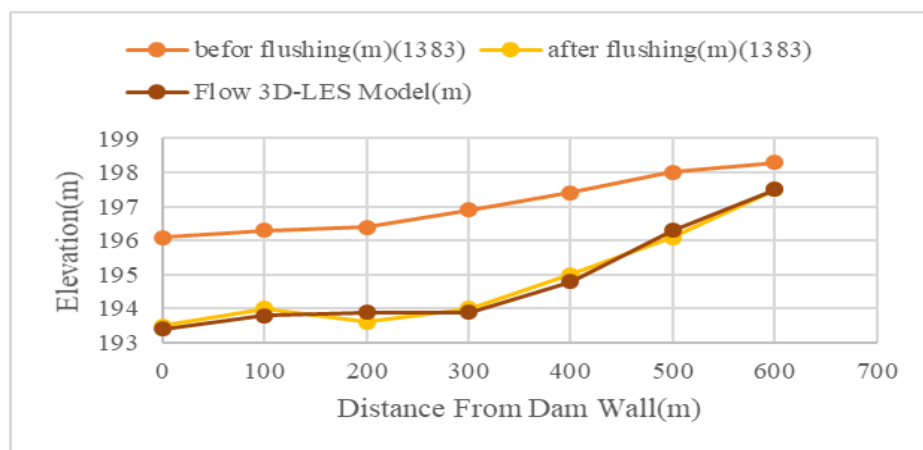


Fig. 5- Comparison of modeling results with LES turbulence model with flushing results of 2004 year

شکل ۵- مقایسه نتایج مدل سازی با مدل آشفتگی LES با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳

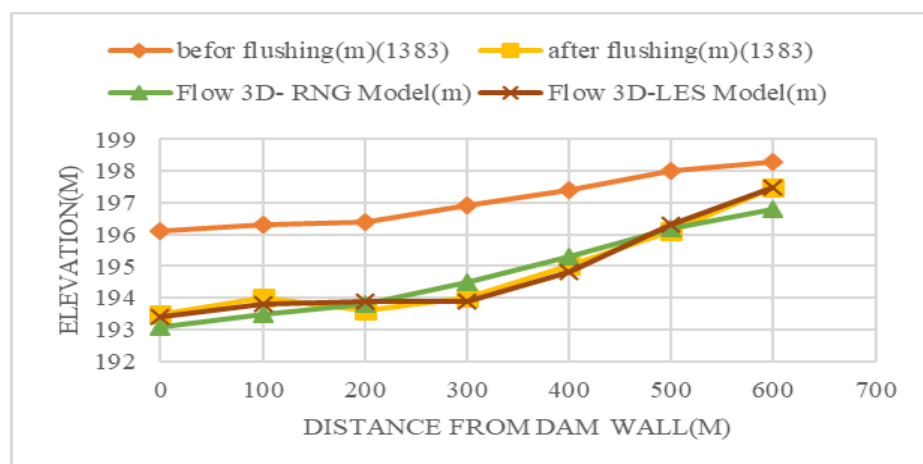


Fig. 6- Comparison of the results of RNG and LES turbulence models and the results of flushing in 2004

شکل ۶- مقایسه نتایج مدل های آشفتگی RNG و LES و نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳

جدول ۵- مقایسه نتایج مدل های آشفته‌گی RNG و LES و نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳

Table 5- Comparison of the results of RNG and LES turbulence models and the results of flushing in 2004

Station(m)	Measurement of Flushing Dam(m)	Flow 3D-RNG Model(m)	Flow 3D-LES Model(m)	RMSE-LES(m)	MAE-LES(m)	R2-LES
0	193.500	193.100	193.4	1.3400	0.9500	1.9520
100	194.000	193.500	193.8	0.7100	0.7100	0.8774
200	193.600	193.800	193.9	0.0600	0.0600	1.1112
300	194.000	194.500	193.9	0.0324	0.1800	0.3811
400	195.000	195.300	194.8	0.0100	0.1000	0.1508
500	196.100	196.200	196.3	0.1500	0.5000	0.6868
600	197.500	196.800	197.5	0.2600	0.6000	5.0150
				RMSE=0.57	MAE=0.454	R2=0.832

نتایج سال ۸۳، مدل LES تا فاصله ۱۲۰ متری از دیواره سد رسوب‌شویی بیشتری را نسبت به سال ۱۳۸۳ نشان می‌دهد. در فاصله ۱۲۰ متری تا ۳۰۰ متری، رسوب‌شویی سال ۸۳ رسوبات بیشتری را نسبت به مدل LES از مخزن خارج کرده است. در محدوده ۳۰۰ متری تا ۵۰۰ متری از دیواره سد، رسوب‌زدایی مدل LES و فلاشینگ سال ۱۳۸۳ تقریباً با هم برابرند. نتایج نشان می‌دهد که در نزدیکی تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد مقدار حداکثر رسوب‌شویی تا بستر مخزن به صورت مخروطی شکل انجام می‌شود. مقادیر بالای ضریب تبیین $R2=0/832$ و مقادیر پایین درصد خطای پیش‌بینی مدل عددی و درصد مربعات خطا، $RMSE=0/57$ و $MAE=0/454$ بیانگر نتایج قابل قبول مدل Flow 3D با شبیه‌ساز LES در مدل‌سازی فلاشینگ سد سفیدرود می‌باشد. مقایسه نتایج بیانگر آن است که مدل آشفته‌گی LES در برآورد حداکثر عمق آبستگي عملکرد بهتری نسبت به مدل آشفته‌گی RNG دارد و نتایج حاصل از آن به نتایج فلاشینگ انجام شده در سال ۱۳۸۳ نزدیک‌تر است.

نتیجه‌گیری

بیشتر مطالعه‌های قبلی با کمک نرم‌افزارهای یک‌بعدی و دوبعدی انجام گرفته و از آنجایی که نرم‌افزارهای یک‌بعدی و دو بعدی توانایی تحلیل دقیق شرایط جریان در داخل مخازن سدها که به صورت سه‌بعدی و در جهات مختلف می‌باشند را ندارند و همچنین باتوجه به مقیاس سد که جز سازه‌های با مقیاس بسیار بزرگ محسوب می‌شود، امکان مدل‌سازی آزمایشگاهی با مقیاس واقعی وجود ندارد، در این تحقیق با استفاده از مدل سه‌بعدی Flow 3D مقیاس واقعی سد سفیدرود با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شد. با بررسی و آنالیز نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳، نتیجه‌گیری می‌شود که نرم‌افزار Flow 3D در مدل‌سازی فلاشینگ سدها، نرم‌افزار قدرتمندی است و در مقایسه مدل‌های آشفته‌گی مختلف

در جدول (۵) نتایج مدل‌سازی با مدل آشفته‌گی RNG و LES با نتایج برداشت شده از فلاشینگ سال ۱۳۸۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است مقادیر بالای ضریب تبیین ($R2$) و مقادیر پایین درصد خطای پیش‌بینی مدل عددی، بیانگر نتایج قابل قبول مدل Flow 3D با شبیه‌ساز LES در مدل‌سازی فلاشینگ سد سفیدرود می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج نشان می‌دهد که در نزدیکی تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد، مقدار حداکثر رسوب‌شویی تا بستر مخزن به صورت مخروطی شکل انجام می‌شود. شکل کلی ناحیه مخروطی در آغاز فرآیند رسوب‌شویی از دو بخش مجزا و قابل تفکیک تشکیل می‌شود. بخش اول شامل یک حفره فرو رفته مرکزی می‌باشد. محل شکل‌گیری این حفره در نزدیکی جداره مدل و در امتداد دریچه تحتانی می‌باشد، که تخلیه رسوب به صورت ثقلی باعث ایجاد آن می‌شود. بخش دوم شامل یک شیب متوسط می‌باشد که به سطح هموار منتهی می‌شود، که در اثر حرکت عمومی جریان به سمت حفره مرکزی می‌باشد. در عملیات رسوب‌شویی تحت فشار، رسوب‌شویی بیشتر محدود به اطراف دریچه‌ها می‌باشد و به‌منظور رسیدن به کانال رسوب‌شویی در طول مخزن و تخلیه حجم زیادی از رسوبات بایستی به جریان رودخانه‌ای برسیم که به این روش، فلاشینگ جریان آزاد گویند. در مقایسه نتایج مدل‌سازی با مدل آشفته‌گی RNG با نتایج فلاشینگ سال ۱۳۸۳ مدل RNG تا فاصله ۱۸۰ متری از دیواره سد، رسوب‌شویی بیشتری را نسبت به فلاشینگ سال ۱۳۸۳ نشان می‌دهد که دلیل آن می‌تواند تغییر دانه‌بندی رسوبات در داخل مخزن و اندازه رسوبات و چسبندگی بیشتر آن‌ها در محدوده نزدیک به دیواره سد در عملیات سال ۸۳ باشد، ولی در محدوده فاصله ۱۸۰ متری تا ۵۰۰ متری از دیواره سد، رسوب‌شویی سال ۱۳۸۳ رسوبات بیشتری را نسبت به مدل RNG از مخزن خارج نموده است. در مقایسه نتایج مدل LES با

مختلف، شبیه سازی شده و نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی بیشتر قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از سازمان آب منطقه ای استان تهران و سازمان آب منطقه ای استان گیلان بابت ارائه ای آمار و اطلاعات تشکر و قدردانی می نمایند.

این نرم افزار، مدل آشفتنی LES از دقت بالاتری نسبت به مدل آشفتنی RNG برخوردار می باشد. توصیه می شود در تحقیقات آینده فلاشینگ سد سفیدرود با سناریوهای متفاوت مانند دبی های مختلف و در ارتفاعات متفاوت آب مخزن سد در هنگام شروع عملیات فلاشینگ و با آزمون باز و بسته بودن دریچه های تخلیه کننده سمت چپ و سمت راست، در هنگام تخلیه رسوبات، شرایط

References

- 1- Abdipor, A. and Ahmadi, H., 2016. Investigation and Evaluation of The Effects of Jet on The Pressure Flushing in Hydropower Reservoirs. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*, 2(7), pp.35-45. Dor: 20.1001.1.23225882.1394.2.7.1.0.
- 2- Agazamani, M., 2013. Sediment washing management of dam reservoirs with GIS and Flow 3D software, Master thesis, *Azad University Central Tehran Branch, Iran*. 127P. (In Persian).
- 3- Atkinson, E. (1996). The feasibility of flushing sediment from Reservoir. Report OD 137, Nov
- 4- Brandt, S.A., 2000. A review of reservoir desiltation. *International Journal of Sediment Research*, 15(3), pp.321-342.
- 5- Chang, F.J., Chen, L. and Chang, L.C., 2005. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(11), pp.2277-2289.
- 6- Fan, J. and Morris, G.L., 1992. Reservoir sedimentation. I: Delta and density current deposits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), pp.354-369. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(354)
- 7- Flow Science, Inc., FLOW-3D User Manual Version 9.3
- 8- Jin, L., 1992. Local Scour Upstream of a Bottom Sluice Gate in Reservoirs, Sediment Management, *Proceedings of the 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe, University of Karlsruhe, Institute of Hydraulic Structures and Agricultural Engineering*, 2, pp.791-798.
- 9- Olsen, N.R., 1999. Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 37(1), pp.3-16.
- 10- Rashidzadeh Davan, A. and Ghadampour, Z., 2017, Study of scour changes in free valve flushing, *16th Iranian Hydraulic Conference*, Ardabil, <https://civilica.com/doc/727527>
- 11- Sadegzadeh, M. M. and Alami, M. T., 2006. Investigation of the effect of sediment release of reservoir dams on the morphology of downstream river using GSTARS 0.3 model (Case study: Sefidrood river), *Seventh International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz*, (In Persian).
- 12- Samadi Brojeni, H., 2002. Predicting sediment concentrations due to sediment leaching in Dez dam downstream and investigating its environmental effects, Final report of the research project, *Research and Standards Office of Khuzestan Water and Electricity Organization*, (In Persian).
- 13- Shafai Bajestan, M., 2012. *Guide to sedimentation and descaling studies of dam reservoirs*, Publication No. 589, (In Persian).
- 14- Shahriari, R and Daryaei, M and Kashefipour, S. M, 2020, Increasing the dimensions of sediment leaching cones in pressurized flushing by placing a T-shaped structure upstream of the orifice, *18th Iranian Hydraulic Conference*, Tehran, <https://civilica.com/doc/998897>.