



## Analyzing the flow pattern changes caused by installing inclined plates upstream of bottom outlet using numerical simulation

Mehdi Daryae<sup>1</sup> , Soraya Naderi<sup>2</sup> , Mahmood Kashefipour<sup>3</sup> , Nima Najafi<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [m.daryae@scu.ac.ir](mailto:m.daryae@scu.ac.ir)

<sup>2</sup> Ph.D. student of Water Structures, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [so-naderi@stu.scu.ac.ir](mailto:so-naderi@stu.scu.ac.ir)

<sup>3</sup> Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [kashefipour@scu.ac.ir](mailto:kashefipour@scu.ac.ir)

<sup>4</sup> Ph.D. student of Water Structures, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [nima-najafi@stu.scu.ac.ir](mailto:nima-najafi@stu.scu.ac.ir)

### ABSTRACT

#### Introduction

The low inflow rate of water into the dam reservoirs causes sedimentation, leading to a decrease in the service life of dam. As a result, the performance of the dam in controlling floods and generating energy through water release downstream will be affected. Additionally, sediment deposition near the bottom outlets and turbines causes their burial, leading to difficulties in their operation and utilization. Installing inclined plates in the upper of bottom outlets is suggested as a new method to increase the number of flushed sediments in pressurized flushing. Awareness of changes in the upstream flow pattern of the orifice is of great importance. In the present study, the effect of installing inclined plates on flow pattern changes in the upstream of the orifice was investigated using the Flow3D model.

#### Methodology

In this study, a numerical model calibration was performed using the results of experiments conducted in the hydraulic laboratory of the Faculty of Water and Environmental Engineering at Shahid Chamran University of Ahvaz, and the RNG turbulence model was chosen for conducting the simulation. The considered variables include plate width, plate installation angle, and plate installation distance to the orifice. In total, 5 scenarios (including the reference test (i.e., without installing plates)) have been defined for the numerical model.

#### Results and discussion

The results showed that the installation of inclined plates against the orifice led to the creation of vortexes and the development of a low-pressure zone, resulting in an increase in the volume of flushed sediment. Also, reducing the width of plates, increasing the installation angle, and increasing the installation distance of the plates will lead to a decrease in the intensity of eddies and a decrease in the range of low-pressure zone, which reduces the effect of installing inclined plates to increase flushed sediment volume.

#### Conclusions

Based on previous studies, the amount of sediment output in pressurized flushing is limited and confined to the vicinity of the dam body. Therefore, this method is not used to revive the dead storage capacity of the dam reservoirs. Ancillary facilities such as bottom outlets and hydro-power plant outlets are located near the dam structure, and sediment entry into these facilities can have destructive effects. Therefore, providing methods to increase sediment discharge from near the dam body can be highly beneficial. Additionally, by creating a low-pressure zone in the upstream of the outlet, a suction effect is created, which can be useful in increasing the volume of sediment discharged during turbidity current discharging from the bottom outlet.

**Keywords:** Bottom Outlet, Flushing Cone, Flushing, Flow Pattern.

**Article Type:** Research Article



**Article history:** Received: 29 August 2023 Revised: 27 October 2023 Accepted: 21 November 2023 ePublished: 15 December 2023

**Cite this article:** Daryae, M., Naderi, S., Kashefipour, S.M., & Najafi, N. (2023). Analyzing the flow pattern changes caused by installing inclined plates upstream of bottom outlet using numerical simulation, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(3), 37-52 DOI: 10.22126/ATWE.2023.9546.1059





## بررسی تغییرات الگوی جریان ناشی از نصب صفحات مورب در بالادست دریچه تخلیه کننده تحتانی با استفاده از شبیه سازی عددی

مهدی دریایی<sup>۱</sup> , ثریا نادری<sup>۲</sup> , سید محمود کاشفی پور<sup>۳</sup> , نیما نجفی<sup>۴</sup> 

<sup>۱</sup> دانشیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [m.daryae@scu.ac.ir](mailto:m.daryae@scu.ac.ir)  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مهندسی سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [soraya.naderi20@gmail.com](mailto:soraya.naderi20@gmail.com)  
<sup>۳</sup> استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [kashefipour@scu.ac.ir](mailto:kashefipour@scu.ac.ir)  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری مهندسی سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [nima-najafi@stu.scu.ac.ir](mailto:nima-najafi@stu.scu.ac.ir)

### چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر نصب صفحات مورب روی تغییرات الگوی جریان در بالادست تخلیه کننده تحتانی با استفاده از مدل Flow3D مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق عبارتند از عرض صفحات، زاویه نصب صفحات و فاصله نصب صفحات تا تخلیه کننده تحتانی. در مجموع ۵ سناریو (با در نظر گرفتن حالت شاهد (بدون نصب صفحات)) برای مدل عددی از جمله تاثیر افزایش فاصله قرار گیری صفحات مورب از تخلیه کننده تحتانی در عرض و زاویه قرار گیری یکسان، تاثیر عرض صفحات مورب بر الگوی جریان در فاصله و زاویه قرارگیری یکسان نسب به تخلیه کننده تحتانی و تاثیر زاویه قرارگیری صفحات مورب با عرض یکسان و فاصله ی برابر از تخلیه کننده تحتانی بر الگوی جریان تعریف شد. برای کالیبراسیون مدل عددی از سه مدل حل آشفتگی  $k-\epsilon$  Laminar و RNG استفاده شد که کالیبراسیون مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انجام و مدل تلاطم RNG با  $R^2=0.9847$  و  $RMSE=14.32$  به منظور انجام شبیه سازی انتخاب شد. برای صحت سنجی مدل های حل آشفتگی از مقایسه سرعت های طولی در راستای مرکز تخلیه کننده تحتانی در حالت شاهد آزمایشگاهی و مدلسازی با سه مدل حل آشفتگی ذکر شده استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد که نصب صفحات مورب در مقابل تخلیه کننده تحتانی منجر به ایجاد گردابه ها و همچنین توسعه ناحیه کم فشار در بالادست شده که منجر به افزایش حجم رسوبات خروجی می شود. همچنین کاهش عرض صفحات، افزایش زاویه نصب و افزایش فاصله نصب صفحات منجر به کاهش شدت گردابه ها و کاهش محدوده ناحیه کم فشار خواهد شده که از تاثیر نصب صفحات مورب به منظور افزایش حجم رسوبات خروجی کاسته می شود. مقایسه کمی تغییرات ناحیه کم فشار و همچنین الگوهای جریان در حالت های مختلف در حالت آزمایشگاهی ممکن نبود. لذا مقایسه ی گرافیکی موارد ذکر شده از جمله مزایای مهم استفاده از مدل عددی نسبت به حالت آزمایشگاهی بود.

**واژه های کلیدی:** تخلیه کننده تحتانی، مخروط رسوبی، فلاشینگ، الگوی جریان.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۷ شهریور ۱۴۰۲، اصلاح: ۰۵ آبان ۱۴۰۲، پذیرش: ۳۰ آبان ۱۴۰۲، چاپ الکترونیکی: ۲۴ آذر ۱۴۰۲

**استناد:** دریایی، م، نادری، ث، کاشفی پور، س.م، و نجفی، ن. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات الگوی جریان ناشی از نصب صفحات مورب در بالادست دریچه تخلیه کننده تحتانی با استفاده از شبیه سازی عددی، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۳(۳)، ۳۷-۵۲. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9546.1059



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

سرعت کم جریان آب ورودی به مخزن سد، موجب ته نشین شدن رسوبات در مخزن شده و در نتیجه حجم مفید مخزن را کاهش می‌دهد. با کاهش حجم مفید مخزن، عملکرد آن در کنترل سیلاب‌ها و تولید انرژی از طریق رهاسازی آب به پایین دست تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. از طرف دیگر نشست رسوبات در نزدیکی درپچه‌های تخلیه کننده تحتانی و توربین‌ها، موجب مدفون شدن آن‌ها شده و بهره‌برداری از آن‌ها را با مشکلاتی مواجه خواهد ساخت. تا کنون از روش‌های مختلفی از جمله عبور جریان غلیظ از مخزن، لایروبی کردن، سیستم کنارگذر و فلاشینگ جهت تخلیه رسوبات نهشته شده در مخزن استفاده شده است. از میان روش‌های مذکور، فلاشینگ یکی از روش‌های متداول و موثر جهت خروج رسوبات از طریق تخلیه کننده تحتانی سد به سمت پایین دست می‌باشد. به صورت کلی فلاشینگ به دو صورت آزاد و تحت فشار انجام می‌گردد. در فلاشینگ آزاد تراز آب درون مخزن تا ارتفاع تخلیه کننده تحتانی پایین آورده شده و یک جریان رودخانه‌ای در مخزن ایجاد می‌شود. در فلاشینگ تحت فشار تراز سطح آب درون مخزن به صورت تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود (شن<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹). فلاشینگ تحت فشار در مخازن بزرگ انجام می‌شود. حجم رسوبات تخلیه شده در فلاشینگ تحت فشار به عوامل مختلفی از جمله تراز سطح آب مخزن، نوع و اندازه رسوبات، تراز رسوبات در جلوی تخلیه کننده، ابعاد و شکل مقطع تخلیه کننده و... بستگی دارد. تا کنون مطالعات متعددی در زمینه‌ی فلاشینگ تحت فشار صورت گرفته است (شمام و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵، امامقلی زاده و فتحی مقدم<sup>۳</sup>، ۲۰۱۴، بریان و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸، مشکاتی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹، پاول و خان<sup>۶</sup>، ۲۰۱۵).

در فلاشینگ تحت فشار بر خلاف فلاشینگ آزاد تخلیه رسوبات به صورت موضعی و تنها در اطراف تخلیه کننده تحتانی صورت می‌پذیرد (شن، ۱۳۹۹). بررسی هیدرولیک جریان در بالادست تخلیه کننده تحتانی موجب شناسایی عوامل موثر بر الگوی جریان، توزیع سرعت و فشار و عوامل موثر بر تقویت گردابه‌های برخاستگی می‌شود. بر این مبنای سال‌های اخیر مطالعاتی در این خصوص انجام شده است. لذا آگاهی از هیدرولیک جریان بالادست تخلیه کننده تحتانی منجر به یافتن راهکارهای مناسب جهت افزایش راندمان فلاشینگ تحت فشار می‌گردد.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

جنزر و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۵) با کارگذاری سازه متشکل از ۴ جت در بالادست تخلیه کننده تحتانی که یک الگوی جریان ورتکس مانند محوری ایجاد کردند. با این روش میزان رسوب منتقل شده از تخلیه کننده تحتانی را نسبت به آزمایش شاهد در حدود دو برابر افزایش دادند. در این آزمایشات جزئیات الگوی جریان و تاثیر آن بر میزان خروج رسوبات با اندازه گیری کدورت و سرعت جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. مددی و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۶) با نصب شمع‌های استوانه‌ای دور تا دور بالادست تخلیه کننده‌ی تحتانی حجم رسوبات تخلیه شده را تا ۳/۵ برابر نسبت به حالت شاهد افزایش دادند. در این تحقیق هد برای تمامی آزمایشات ثابت و برابر با ۴۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. دو متغیر دبی و فاصله‌ی کارگذاری پایه‌ها در آزمایشات متفاوت تغییر می‌یافت. وجود شمع‌های استوانه‌ای به خودی خود باعث افزایش چاله آبستگی می‌شد و افزایش قطر پایه عمق مخروط رسوبشویی را افزایش می‌داد. اما این افزایش قطر اگر از حدی بیشتر می‌شد، پایه‌ها مانند مانعی در مقابل جریان عمل کرده که در نتیجه کاهش سرعت و آشفتگی جریان باعث کاهش عمق رسوبشویی می‌شد. در تحقیق دیگر مددی و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۷) با طرح سازه PSC (Projecting Semi-Circular structure) و اتصال آن به بالادست تخلیه کننده تحتانی، میزان حجم رسوبات منتقل شده به سمت پایین دست را تا ۴/۵ برابر نسبت به حالت شاهد افزایش دادند. در این تحقیق با نصب این سازه در بالادست تخلیه کننده تحتانی طول، عرض و عمق مخروط رسوبشویی به ترتیب به میزان ۲۸۰، ۴۵ و ۱۴ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافت که همین امر سبب افزایش راندمان رسوبشویی تحت فشار به میزان ۴۵۰ درصد نسبت به حالت شاهد گردید. مهتابی و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۸) با تغییر آرایش صفحات مستغرق در بالادست تخلیه کننده تحتانی از حالت موازی به شعاعی، حجم رسوبات

<sup>1</sup> Shen

<sup>2</sup> Shammaa et al

<sup>3</sup> Emamgholizadeh & Fathi-Moghadam

<sup>4</sup> Bryant et al

<sup>5</sup> Meshkati et al

<sup>6</sup> Powell & Khan

<sup>7</sup> Jenzer et al

<sup>8</sup> Madadi et al

<sup>9</sup> Madadi et al

<sup>10</sup> Madadi et al

تخلیه شده به همراه جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی تا ۱۱/۳۳ برابر نسبت به حالت شاهد افزایش یافت. در این آزمایشات تاثیر آرایش این صفحات در افزایش قدرت جریان گردابی و افزایش راندمان رسوبشویی تحت فشار مورد آزمایش قرار گرفت که علاوه بر بدست آمدن مقادیر بهینه طول های بی بعد آرایش شعاعی این نتیجه حاصل گشت که در این نحوه قرار گیری افزایش عمق آب مخزن موجب افزایش راندمان رسوبشویی می گردد به عبارت دیگر عملیات رسوبشویی در حالت مخزن پر راندمان بالایی داشته و نیاز به تخلیه ی آب مخزن نیست. بیوض پور و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۱) با نصب پایه با سطح مقطع مثلثی در بالادست تخلیه کننده تحتانی، میزان رسوبات انتقال یافته به پایین دست را تا ۷/۵ برابر نسبت به حالت شاهد افزایش دادند. این آزمایشات با ۳ دبی متفاوت انجام شد و مشاهده گردید که در حالت استفاده از این پایه در بالادست تخلیه کننده ی تحتانی طول، عمق و عرض مخروط رسوبشویی به ترتیب ۱۳۳، ۱۳۶ و ۸۰ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافت. در نهایت مشاهده شد که افزایش فاصله قرارگیری بین پایه و تخلیه کننده تحتانی تاثیر کارگذاری پایه روی حجم رسوبشویی را کاهش می دهد.

حق جویی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۱) با استفاده از سازه DBE (Dendritic Bottomless Extended) متصل به بالادست تخلیه کننده کننده تحتانی، حجم رسوبات خروجی از تخلیه کننده را در حدود ۱۰ برابر نسبت به آزمایش شاهد افزایش دادند. مشابه سازه PSC معرفی شده در تحقیقات مددی و همکاران (۲۰۱۷) که از لوله ای که قسمت تحتانی آن حذف شده بود، سازه DBE نیز از لوله هایی تشکیل شده که قسمت تحتانی آنها حذف گردیده و به یکدیگر متصل شده اند، سازه DBE نیز از یک وجه به صورت کامل با رسوبات در تماس بوده و نیز برای کارگذاری آن باید به درجه تخلیه کننده تحتانی متصل گردد. این آزمایشات با در نظر گرفتن سه ارتفاع رسوب، سه دبی و چهار ساختار سازه با زوایای مختلف انجام شد.

بیرامی پور و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۱) با طرح سناریوی آرایش واگرا برای صفحات مستغرق در بالادست تخلیه کننده تحتانی، میزان ذرات رسوبی تخلیه شده از تخلیه کننده تحتانی را تا حدود ۴۸ برابر نسبت به حالت شاهد افزایش دادند. برای بررسی حجم مخروط رسوبشویی و راندمان حذف رسوبات آزمایشاتی با میزان استغراق های مختلف، زوایای مختلف در راستای جریان، فاصله و ترتیبات واگرا و همگرا انجام و با استفاده از نتایج تجربی سه معادله برای تخمین ابعاد مخروط رسوبشویی پیشنهاد شد. همانطور که مشاهده می شود در تمام این تحقیقات راهکارهای ارائه شده منجر به افزایش آشفستگی در بالادست تخلیه کننده تحتانی و به دنبال آن افزایش حجم رسوبات خروجی شده است. پاول و خان<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) با استفاده از مدل آزمایشگاهی نحوه جابجایی و همچنین گستردگی و شکل رسوبشویی بالادست یک تخلیه کننده تحتانی دایره ای را تحت شرایط جریان ماندگار و در سه ارتفاع آب بالای تخلیه کننده تحتانی برای سه نوع اندازه رسوب مورد بررسی قرار دادند. آن ها از این تحقیق نتیجه گیری کردند که انتقال رسوبات از تخلیه کننده تحتانی در فلاشینگ تحت فشار در دو مرحله صورت می پذیرد. در اولین مرحله، تحت اثر تنش برشی ایجاد شده روی بستر در مجاورت تخلیه کننده تحتانی، رسوبات جابه جا شده و سپس در مرحله ی بعد گردابه هایی در بالادست تخلیه کننده تحتانی ایجاد می شود. این گردابه ها موجب جابه جایی و انتقال حجم بیشتری از رسوبات همراه جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی می شود. لذا با افزایش شدت گردابه ها میزان رسوبات بیشتری از تخلیه کننده تحتانی به پایین دست مخزن سد تخلیه خواهد شد. یکی از روش های افزایش شدت این گردابه ها کارگذاری صفحه مقابل جریان خروجی در بالادست تخلیه کننده تحتانی می باشد. برخورد جریان به صفحه باعث ایجاد پدیده ی جداسدگی جریان و افزایش آشفستگی و تلاطم در بالادست تخلیه کننده تحتانی می شود (شهریاری و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۱). با توجه به شعاعی بودن خطوط جریان در بالادست تخلیه کننده تحتانی در تحقیق دیگر نجفی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۲) به منظور افزایش تلاطم جریان بالادست تخلیه کننده تحتانی از کارگذاری صفحات مورب استفاده کردند و توانستند حجم رسوبات خروجی را تا ۱۹ برابر افزایش دهند. در این تحقیق سه عرض و سه فاصله نصب صفحه با دو دبی بررسی شد که در کل ۵۶ آزمایش با استفاده از ترکیب عرض، فاصله، زاویه قرار گیری و دبی خروجی انجام گردید. مشاهده شد که بیشترین تاثیر کارگذاری صفحات مورب را در نزدیک ترین فاصله به تخلیه کننده تحتانی خروجی اتفاق می افتد. همچنین نتیجه گیری شد که با افزایش اندازه عرض صفحه،

<sup>1</sup> Beyvazpour et al

<sup>2</sup> Haghjouei et al

<sup>3</sup> Beiramipour et al

<sup>4</sup> Powell & Khan

<sup>5</sup> Shahriari et al

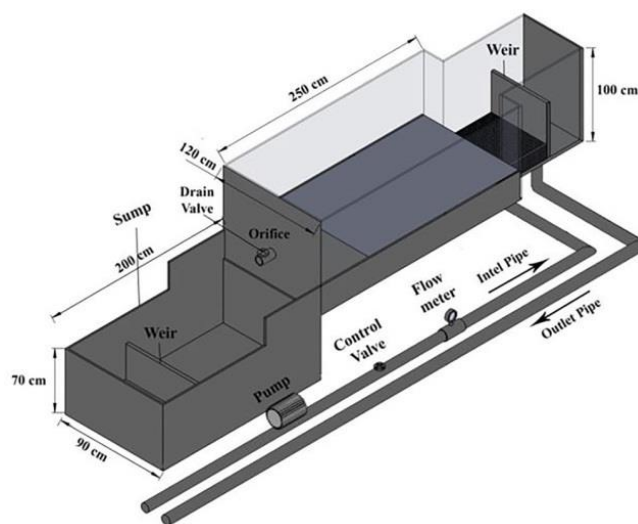
<sup>6</sup> Najafi et al

زاویه قرارگیری نسبت به تخلیه کننده تحتانی و دبی خروجی، حجم مخروط رسوبشویی افزایش خواهد یافت. به طوری که حجم مخروط رسوبشویی با کارگذاری صفحات مورب در نزدیکترین فاصله از تخلیه کننده تحتانی، بیشترین عرض صفحه، بیشترین زاویه قرارگیری صفحات نسبت به تخلیه کننده تحتانی و بزرگترین دبی خروجی، ۱۷۳۳ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافت.

اندازه گیری مولفه های سرعت و فشار در آزمایشگاه در حضور صفحات مورب بالادست تخلیه کننده تحتانی به عنوان یک روش جدید در افزایش حجم رسوبات خروجی در فلاشینگ تحت فشار حین انجام آزمایش بسیار دشوار است. لذا در تحقیق حاضر تغییرات الگوی جریان ناشی از نصب صفحات مورب در بالادست تخلیه کننده تحتانی با استفاده از نرم افزار Flow3D شبیه سازی شد. با استفاده از نتایج شبیه سازی عددی، تاثیر نصب این صفحات روی تغییرات الگوی جریان و توزیع فشار بالادست تخلیه کننده تحتانی که منجر به افزایش میزان رسوبات خروجی می شود مورد بررسی قرار گرفت.

## روش پژوهش مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از اطلاعات آزمایشگاهی نجفی و همکاران (۲۰۲۲) استفاده شده است. برای انجام آزمایشها، از یک مخزن مستطیلی با طول ۲/۵ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر به عنوان مدل فیزیکی استفاده شده است. در دیواره ی پایین دست این مخزن، یک تخلیه کننده تحتانی به قطر ۷ سانتی متر به عنوان دریچه تخلیه کننده تحتانی تعبیه شده و نیز از یک شیر تخلیه برای باز کردن تخلیه کننده تحتانی و انتقال جریان به سمت پایین دست استفاده گردید که در ادامه جریان خروجی را به درون یک مخزن در پایین دست فلوم آزمایشگاهی، برای ته نشینی رسوبات تخلیه شده از تخلیه کننده تحتانی هدایت می کرد. شکل (۱) شماتیکی از فلوم مورد استفاده ا نشان داده است.



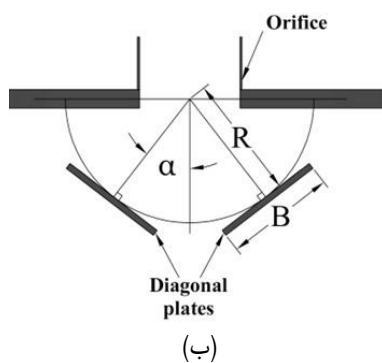
شکل ۱. شماتیکی از فلوم مورد استفاده (نجفی و همکاران، ۲۰۲۲).

## سناریوهای شبیه سازی

به منظور بررسی تاثیر نصب صفحات مورب روی میزان رسوبشویی و تغییر در الگوی جریان بالادست تخلیه کننده تحتانی ۵ سناریوی مختلف مطابق جدول (۱) از تحقیق نجفی و همکاران در نظر گرفته شد (نجفی و همکاران، ۲۰۲۲). متغیرهای موردنظر عبارتند از عرض صفحات مورب (B)، فاصله نصب صفحات مورب تا تخلیه کننده تحتانی (R) و زاویه قرارگیری صفحات نسبت به محور تخلیه کننده تحتانی ( $\alpha$ ) که در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامتر سناریوهای تعریف شده برای شبیه سازی در مدل Flow-3D

Senario	R (cm)	$\alpha$ (°)	B (cm)
A (Reference test)	-	-	-
B	۸/۴	۶۰	۶/۳
C	۸/۴	۶۰	۶/۳
D	۱۲/۶	۶۰	۶/۳
E	۸/۴	۳۰	۶/۳



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف. نحوه نصب صفحات و ب. متغیرهای سناریوهای مختلف

در تحقیق نجفی و همکاران (۲۰۲۲) برای انجام آزمایشات از رسوبات غیر چسبیده با اندازه متوسط قطر ۰/۵ میلی متر با چگالی ذرات ۲/۶۵ و با انحراف استاندارد هندسی ۱/۵۵ استفاده شد. سطح آب درون مخزن در تراز ۴۹ سانتی متر در بالای مرکز تخلیه کننده تحتانی با قطر ثابت ۷ سانتی متر ثابت در نظر گرفته شد. دبی مورد استفاده در آزمایشات، ۸/۳۴ لیتر بر ثانیه بوده که توسط یک دبی سنج الکترومغناطیسی تنظیم گردید. برای انجام آزمایشات، در ابتدا صفحات مورب در بالادست تخلیه کننده تحتانی نصب می شد. به نحوی که لبه بالایی صفحات منطبق با لبه بالایی تخلیه کننده تحتانی باشد. سپس رسوبات در بالادست تخلیه کننده تحتانی تا زیر لبه پایینی تخلیه کننده تحتانی متراکم شده و با استفاده از متر لیزری تسطیح می شد. شکل (الف، ۲) معرف این موضوع است. در شروع آزمایش شیر تخلیه تخلیه کننده تحتانی و سیستم زهکشی بسته شده و با استفاده از پمپ، جریان آب با دبی مورد نظر به آهستگی و به تدریج وارد مخزن اصلی فلوم شده تا رسوبات از جای خود حرکت نکرده و به صورت تسطیح شده باقی بمانند. پس از استغراق کامل مقطع رسوبات، دبی جریان ورودی توسط دبی سنج الکترومغناطیس روی دبی مورد نظر تنظیم می شد. با رسیدن سطح آب درون مخزن به تراز مورد نظر شیر تخلیه کننده تحتانی کاملاً باز شده و جریان خروجی مخلوط آب و تخلیه رسوبات به سمت پایین دست آغاز می شد. لازم به ذکر است برای دبی مذکور عمق آب در مخزن پس از باز کردن کامل شیر تخلیه ثابت می ماند. پس از پایان هر آزمایش، شیر جریان خروجی بسته شده و آب موجود در مخزن توسط سیستم زهکشی موجود تخلیه می شد. پس از آن با استفاده از دستگاه متر لیزری Leica مدل Disto D510 با دقت  $\pm 1$  میلی متر، در مش بندی  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  در جهت طولی و عرضی، در هر نقطه میزان عمق ایجاد شده نسبت به سطح مبنا برداشت می شد.

## معرفی مدل عددی

نرم افزار Flow-3D یک نرم افزار تحلیل عددی است که قابلیت تحلیل دوبعدی و سه بعدی جریان را دارد. معادلات کلی حاکم بر مدل، معادلات ناویر استوکس و پیوستگی هستند که مدل مذکور به طور همزمان این معادلات را به صورت سه بعدی حل می کند. شکل کلی معادله ی پیوستگی جرم به صورت زیر است:

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

که  $V_F$  کسر حجمی جریان،  $\rho$  دانسیته ی سیال،  $R_{DIF}$  عبارت پخش آشفتگی و  $R_{SOR}$  منبع جرم هستند. اجزا سرعت  $(u, v, w)$  در مختصات کارتزین در جهت  $(x, y, z)$  و در مختصات قطبی در جهت  $(r, \theta, z)$  هستند.  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  برابر کسرهای سطحی برای جریان در سه جهت مختصاتی  $x$ ،  $y$  و  $z$  است و  $R$  نیز تابعی از سیستم مختصاتی است.

برای سیالات غیرقابل تراکم،  $\rho$  در معادله ی پیوستگی ثابت است و معادله ی (۱) به صورت زیر نوشته می شود:

$$-(u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (2)$$

معادلات دیگر مورد استفاده در نرم افزار FLOW-3D، معادلات مومنتم هستند. معادلات حرکت برای مولفه های سرعت سیال  $(u, v, w)$  در سه جهت مختصات یا به عبارت دیگر معادلات ناویر-استوکس به صورت معادله ی (۳) تا (۵) ارائه می شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (4)$$

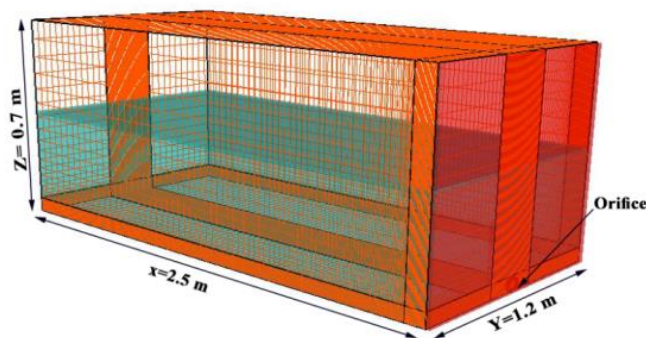
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - u_w - \delta w_s) \quad (5)$$

در این معادلات  $(G_x, G_y, G_z)$  شتابهای بدنه،  $(f_x, f_y, f_z)$  شتابهای ناشی از لزجت،  $(b_x, b_y, b_z)$  افت جریان در محیطهای دارای خلل و فرج و عبارت آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است.  $U_w = (u_w, v_w, w_w)$  مولفه های سرعت جز منبع است که در صورت تعریف کردن General Moving Object مقدارشان غیر از صفر است.  $U_s = (u_s, v_s, w_s)$  مولفه های سیال در سطح منبع نسبت به خود آن است.

## مش بندی، شرایط مرزی و اجرای مدل

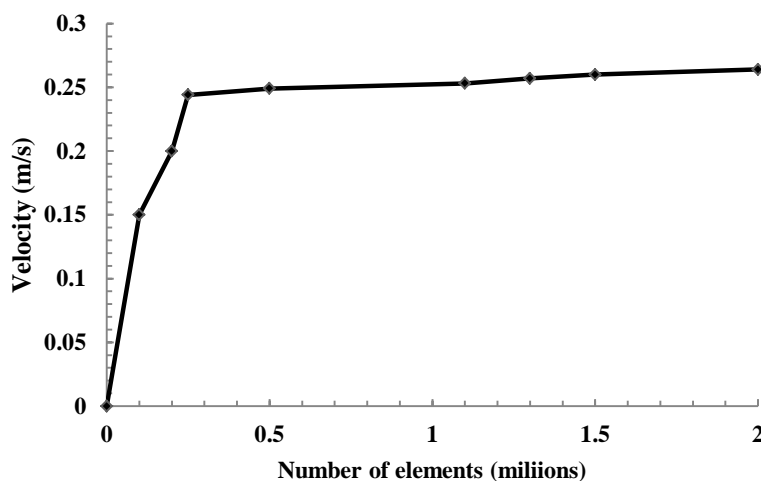
برای ایجاد شبکه حل در مدل عددی Flow-3D از شبکه حل مکعبی استفاده گردید. شبکه تعریف شده برای شبیه سازی دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲/۵، ۱/۲ و ۰/۷ متر بود که با اندازه میانگین مش کل هندسه ۲/۳ سانتی متری تعداد کل مشهای شبکه حل به ۲۴۳۴۷۲ مش رسید. لازم به ذکر است که در مجاورت تخلیه کننده تحتانی و صفحات نصب شده به دلیل نیاز به مشاهده جزئیات بیشتر از ابعاد مش ریزتری استفاده گردید به نحوی که در بازه ی ۱۰ سانتی متری از هر طرف تخلیه کننده تحتانی در راستای  $y$  تعداد مشها ۳۰ عدد و در فاصله کف تا بالای تخلیه کننده تحتانی در راستای  $z$  تعداد مشها ۲۵ عدد در نظر گرفته شد که ابعاد مشها در این نواحی به دلیل اهمیت دقت بالای نتایج کوچکتر از میانگین اندازه مشها در سایر جهات است و در شکل (۳) نشان داده شده است. تعداد مشها به

تفکیک در راستای طول شبکه ۱۰۹، در راستای عرض ۵۲ و در راستای ارتفاع فلوم ۴۳ عدد بود که کوچکترین ابعاد مشخص شده در راستای ارتفاع فلوم و به اندازه‌ی ۰/۲۸ سانتی‌متر در راستای  $Z$  و  $Y$  و بزرگترین ابعاد تعریف شده برای شبکه حل نیز در راستای عرض و در مجاورت دیواره‌ها و به اندازه‌ی ۱۱ سانتی‌متر بود.



شکل ۳. مش بندی تعریف شده برای شبیه‌سازی

یکی از مهمترین مزایای استفاده از مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی صرفه جویی در وقت است. در مدل عددی به هر میزان که مش کوچکتری انتخاب گردد دقت نتایج بالاتر رفته و زمان شبیه‌سازی نیز افزایش می‌یابد ولی این نکته به آن معنا نیست که برای کیفیت بیشتر پیوسته می‌توان اندازه مش را کوچکتر کرد. کوچکتر شدن مش از اندازه‌ای به بعد نه تنها تاثیری بر دقت نتایج نداشته بلکه باعث وقوع عدم پایداری در حل عددی نیز می‌گردد. انتخاب اندازه‌ی بهینه‌ی مش به نحویکه هم نتایج از دقت کافی برخوردار باشند و هم زمان شبیه‌سازی بهینه باشد در هر شبیه‌سازی متفاوت است و با بررسی چندین اندازه‌ی مش در شبیه‌سازی یکسان و مقایسه نتایج حاصل می‌گردد. در این تحقیق با کوچکتر کردن ابعاد مش‌ها و مقایسه سرعت خروجی در زمان و مکان یکسان، اندازه مش‌بندی بهینه انتخاب گردید (شکل ۴). لازم به ذکر است محل اندازه‌گیری سرعت در امتداد محور عبوری از مرکز تخلیه‌کننده تحتانی و در ۵ سانتیمتری بالادست آن می‌باشد. در مدل Flow-3D به منظور در نظر گرفتن تاثیر لایه مرزی در نزدیکی جداره‌ها، پارامتر بدون بعد  $y^+$  تعریف می‌شود. این پارامتر باید در محدوده  $30 < y^+ < 11/225$  باشد. در تحقیق حاضر این پارامتر معادل  $15/23$  تعیین شد (محمدپور و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳).

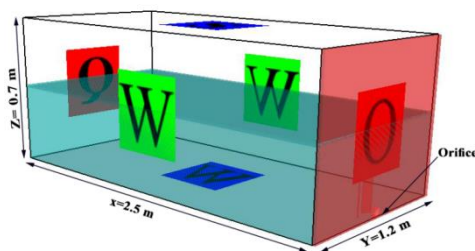


شکل ۴- ارزیابی تاثیر افزایش تعداد مش‌ها در دقت نتایج

<sup>۱</sup>Mohammadpour et al



تعریف شبکه مرزی بر روی شبکه حل به اینگونه بود که در ورودی فلووم ( $X_{min}$ ) شرط مرزی *Volume Flow Rate* با دبی  $0.100834$  متر مکعب بر ثانیه و عمق ثابت آب ورودی  $49$  سانتی متر از مرکز تخلیه کننده تحتانی، صفحه خروجی ( $X_{max}$ ) شرط مرزی *OutFlow*، دیواره‌های جانبی و کف فلووم شرط مرزی *Wall* و سقف فلووم نیز *Symmetry*، تعریف گردید (شکل ۵).



شکل ۵- شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده در شبیه سازی

برای بررسی دقت نتایج از شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ ) و مجذور مربعات خطا (*RMSE*) مطابق روابط (۶) و (۷) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_m - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_m - \bar{y}_p)^2} \quad (۶)$$

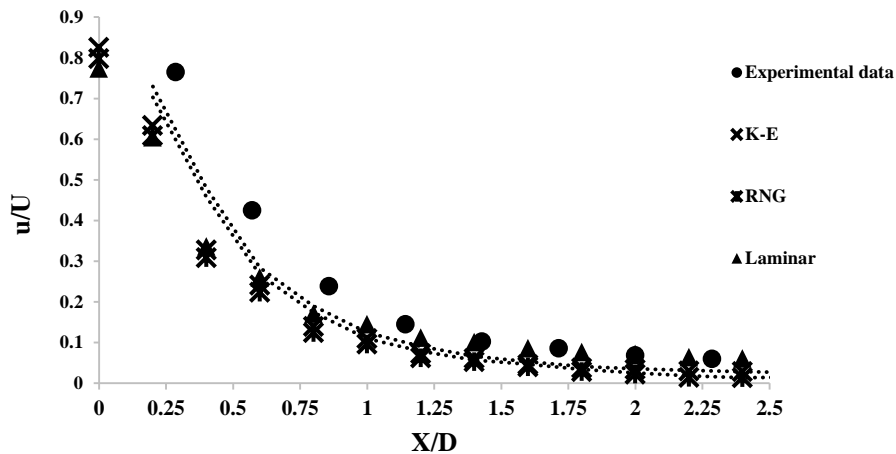
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_m - y_p)^2}{n}} \quad (۷)$$

در این روابط  $n$ : تعداد داده‌ها،  $y_m$ : مقادیر اندازه‌گیری شده و  $y_p$ : مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

## یافته‌ها

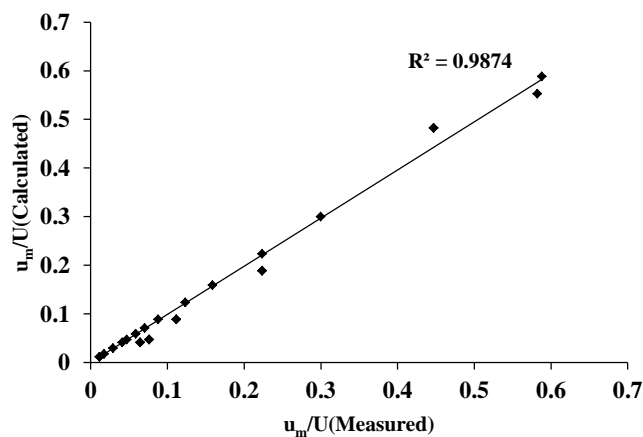
### کالیبراسیون مدل عددی

برای کالیبراسیون مدل عددی از نتایج مقاله (نادری و همکاران، ۲۰۲۲) استفاده شد. در تحقیق آنها تراز رسوبات تا لبه پایین تخلیه کننده تحتانی تسطیح شده و برای جلوگیری از ایجاد اختلال ناشی از حرکت رسوبات در نتایج اندازه‌گیری، با استفاده از یک لایه نازک سیمان سطح رسوبات پوشیده شد. سپس پروفیل‌های طولی و عرضی سرعت در بالادست تخلیه کننده تحتانی با استفاده از دستگاه سرعت سنج الکترومغناطیس (JFE ALEC, Model ACM3-RS) با دقت اندازه گیری دستگاه  $\pm 2\%$  اندازه‌گیری گردید. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد مدل عددی Flow-3D قادر پیش‌بینی مولفه‌های سرعت در بالادست تخلیه کننده تحتانی با دقت قابل قبول می‌باشد. برای انتخاب معادله حل آشفتگی با دقت مناسب شبیه سازی از سه مدل حل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، Laminar و RNG استفاده شد. در هر سه شبیه سازی سرعت در راستای  $20$  سانتی متر بالادست مرکز تخلیه کننده تحتانی در راستای طولی و سرعت جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی استخراج گردید. سپس پروفیل نسبت سرعت طولی به سرعت خروجی از تخلیه کننده تحتانی در مقابل نسبت فاصله از بالادست تخلیه کننده تحتانی به قطر تخلیه کننده تحتانی ترسیم گردید و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد (شکل ۶). در شکل ۶  $u$  سرعت طولی در راستای مرکز بالادست تخلیه کننده تحتانی،  $U$  سرعت جریان خروجی از تخلیه کننده،  $x$  فاصله از بالادست و  $D$  قطر تخلیه کننده را نشان می‌دهد.



شکل ۶- پروفیل طولی سرعت در راستای بالادست مرکز تخلیه کننده تحتانی

برای کالیبراسیون مدل پس از استخراج نتایج از دو شاخص  $R^2$  و RMSE استفاده گردید که در مدل تلاطم RNG با  $R^2=0.9847$  و  $RMSE=14.32$  به عنوان مدل تلاطم برای سایر شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. در این شکل  $u_m$  معرف اندازه سرعت برآیند در نقطه می- باشد.



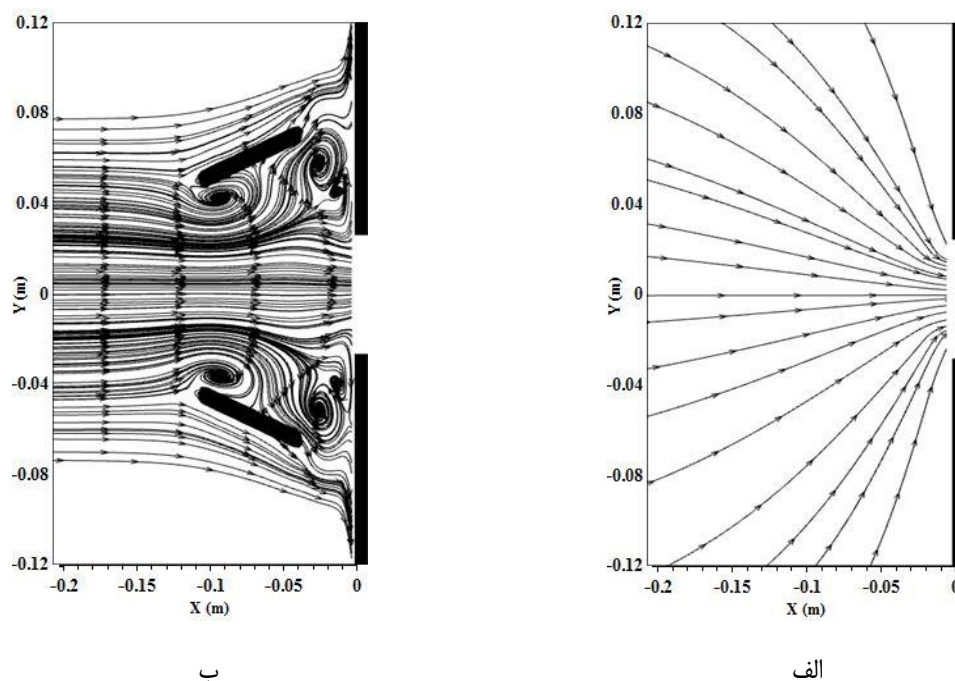
شکل ۷- نتایج کالیبراسیون مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

### تاثیر نصب صفحات مورب بالادست تخلیه کننده تحتانی روی الگوی جریان

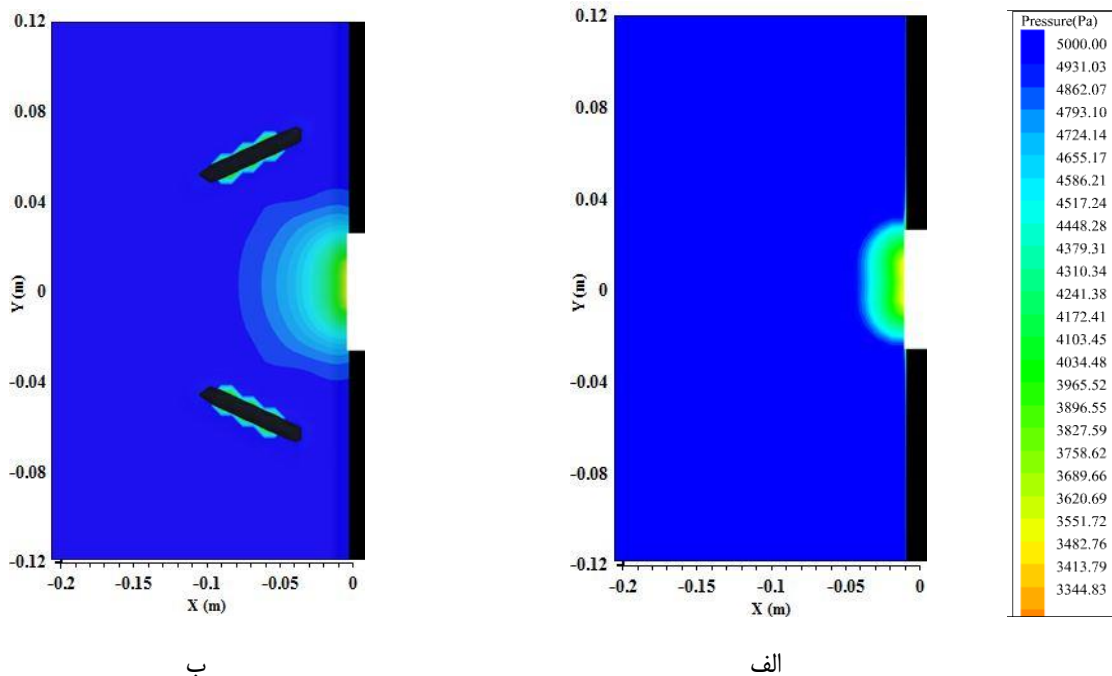
همانطور که عنوان شد الگوی جریان در بالادست تخلیه کننده تحتانی به صورت شعاعی است. این خطوط با برخورد به صفحات مورب در بالادست تخلیه کننده تحتانی دچار پدیده جداشدگی می‌شوند. این جداشدگی باعث تشدید گردابه‌های برخاستگی در مقایسه با حالت شاهد (شکل ۸) و توسعه‌ی ناحیه کم فشار در بالادست تخلیه کننده تحتانی می‌گردد (شکل ۹). بعد از گذشت مدتی از عملیات فلاشینگ تحت فشار گردابه‌هایی در بالادست تخلیه کننده تحتانی تشکیل شده که عامل اصلی تخلیه رسوبات می‌باشد (پاول و خان‌۱۵، ۲۰۱۵). لذا تشدید این گردابه‌ها می‌تواند حجم رسوبات خروجی را افزایش دهد. در شکل‌های ۸- ب و ۹- ب نتایج سناریوی B ارائه شده است. بر اساس مطالعات نجفی و همکاران (۲۰۲۲) نصب صفحات مطابق با سناریوی B توانسته تا ۱۹ برابر حجم رسوبات خروجی را نسبت به حالت بدون نصب صفحات افزایش دهد. به منظور بررسی تاثیر زاویه نصب صفحات روی الگوی جریان، سناریوهای B و E با هم مقایسه شده‌اند.

در شکل ۱۰ الگوی جریان و توزیع فشار مربوط به سناریوی E ارائه شده است. مولفه اصلی سرعت در جریان بالادست تخلیه کننده تحتانی عمود بر تخلیه کننده تحتانی می باشد (بریانت و همکاران، ۴، ۲۰۰۸) لذا چنانچه فاصله بین صفحات در تخلیه کننده تحتانی زیاد باشد حجم جریان بیشتری از بین دو صفحه عبور کرده که منجر به خروج بیشتر رسوبات خواهد شد. همچنین در این حالت گردابه ها در اطراف تخلیه کننده تحتانی تشکیل شده و منجر به ایجاد آشفتگی بیشتر در رسوبات در بالادست و در نزدیکی تخلیه کننده تحتانی می شود. در نتیجه رسوبات بیشتری به همراه جریان از تخلیه کننده تحتانی خارج می شوند. همچنین همانطور که مشاهده می شود با کاهش زاویه نصب از ۶۰ به ۳۰ درجه، فاصله بین صفحات در مقابل تخلیه کننده تحتانی کاهش یافته است. بر اساس شکل ۱۰ این موضوع باعث شده که بیشتر خطوط جریان به کناره ها منحرف شود. در نتیجه گردابه های اصلی و ناحیه های کم فشار در محل انتهایی صفحات تشکیل شده است. به دلیل عدم وجود مولفه اصلی سرعت در این محل بر اساس نتایج نجفی و همکاران (۲۰۲۲) حجم رسوبات خروجی در این حالت به میزان ۵۹ درصد نسبت به زاویه نصب ۶۰ درجه کاهش یافته است.

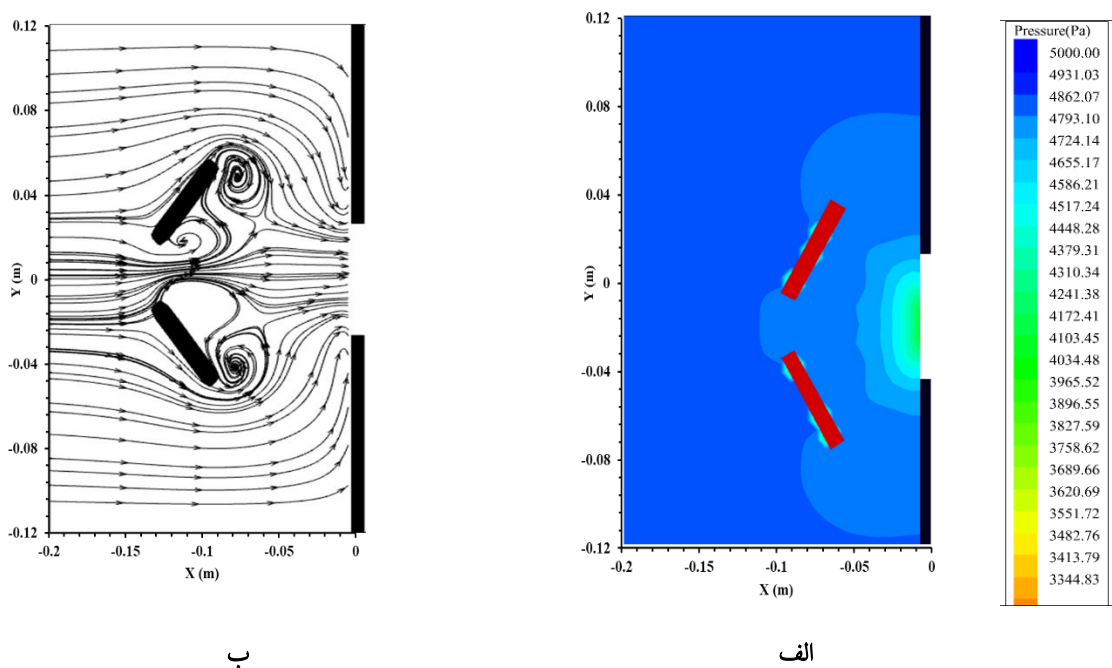
به منظور بررسی تاثیر عرض صفحات مورب روی الگوی جریان سناریوهای B و C با هم مقایسه شدند. همانطور که مشاهده می شود با کاهش عرض صفحات در سناریوی C از شدت گردابه ها نسبت به سناریوی B کاسته شده و همچنین وسعت ناحیه کم فشار کاهش یافته است (شکل ۱۱). می توان گفت با کاهش عرض صفحات میزان جداسازی خطوط جریان در اثر برخورد با صفحات کاهش یافته و در نتیجه وسعت ناحیه کم فشار کاهش یافته است. لذا از شدت گردابه های برخاستگی نیز کاسته شده است. بر اساس مطالعات نجفی و همکاران (۲۰۲۲) میزان حجم رسوبات خروجی در سناریوی C نسبت به سناریوی B تقریباً ۳ برابر کاهش یافته است.



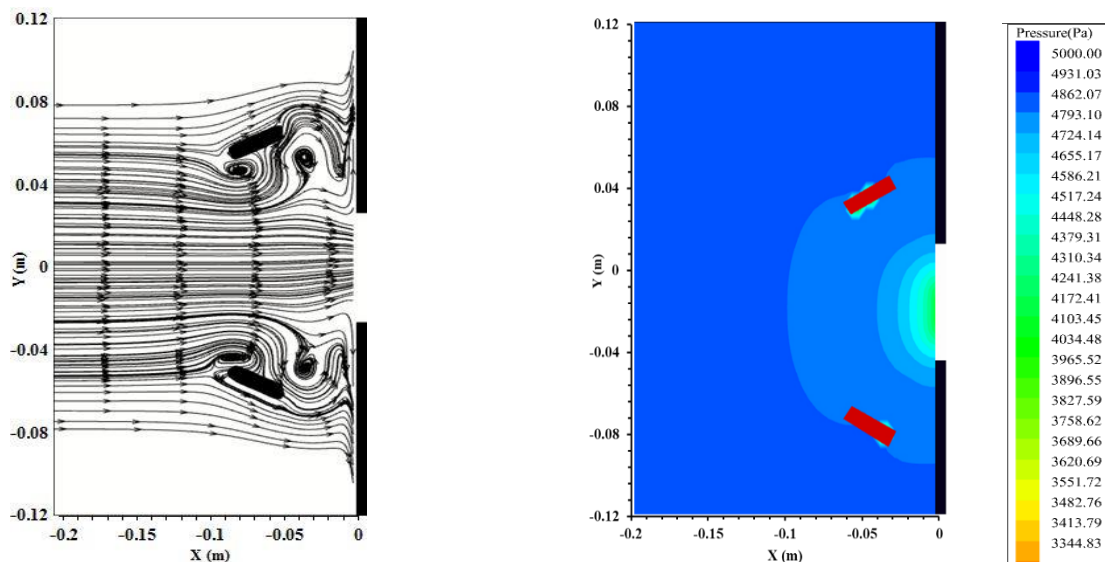
شکل ۸- الگوی جریان، (الف) سناریوی A و (ب) سناریوی B



شکل ۹- (الف) توزیع فشار سناریوی E و (ب) الگوی جریان سناریوی E



شکل ۱۰- (الف) توزیع فشار سناریوی E و (ب) الگوی جریان سناریوی E

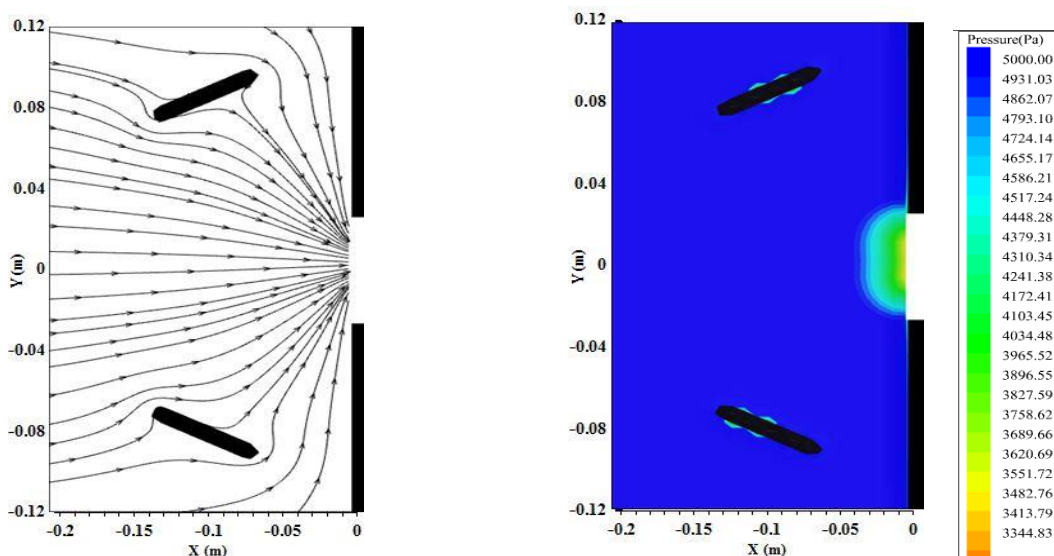


ب

الف

شکل ۱۱- توزیع فشار سناریوی C و (ب) الگوی جریان سناریوی C

به منظور تاثیر فاصله نصب صفحات سناریوهای B و D با هم مقایسه شدند. بر اساس مطالعات برینانت و همکاران با افزایش فاصله از بالادست تخلیه کننده تحتانی سرعت جریان کاسته شده و تقریباً به سمت صفر میل می کند (برینانت و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸). لذا در سناریوی D جریان با سرعت بسیار کمتری نسبت به سناریوی B به صفحات مورب در بالادست تخلیه کننده تحتانی برخورد نموده و در نتیجه میزان جاداشدگی و به دنبال آن گردابه ها کاهش می یابد. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می شود توزیع سرعت و الگوی فشار در سناریوی D تقریباً مشابه حالت شاهد (سناریوی A) می باشد. بدین معنی که با افزایش فاصله نصب صفحات مورب تاثیر آنها در افزایش حجم رسوبات خروجی کاهش می یابد. بر اساس مطالعات نجفی و همکاران میزان حجم رسوبات خروجی در سناریوی D نسبت به سناریوی B تقریباً ۱۰ برابر کاهش یافته است (نجفی و همکاران<sup>۱۷</sup>، ۲۰۲۲).



ب

الف

شکل ۱۲- توزیع فشار سناریوی D و (ب) الگوی جریان سناریوی D

## بحث

اندازه گیری مولفه های سرعت و فشار در آزمایشگاه در حضور صفحات مورب بالادست تخلیه کننده تحتانی به عنوان یک روش جدید در افزایش حجم رسوبات خروجی در فلاشینگ تحت فشار حین انجام آزمایش بسیار دشوار است. لذا در تحقیق حاضر تغییرات الگوی جریان ناشی از نصب صفحات مورب در بالادست تخلیه کننده تحتانی با استفاده از نرم افزار Flow3D شبیه سازی شد. در این تحقیق از اطلاعات آزمایشگاهی نجفی و همکاران (۲۰۲۲) استفاده شده است. برای انجام آزمایش ها، از یک مخزن مستطیلی با طول ۲/۵ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر به عنوان مدل فیزیکی استفاده شده است. در دیواره ی پایین دست این مخزن، یک تخلیه کننده تحتانی به قطر ۷ سانتی متر به عنوان دریچه تخلیه کننده تحتانی تعبیه شده و نیز از یک شیر تخلیه برای باز کردن تخلیه کننده تحتانی و انتقال جریان به سمت پایین دست استفاده گردید.

## نتیجه گیری

همانطور که عنوان شد هدف از تحقیق حاضر شبیه سازی الگوی جریان و توزیع فشار بالادست تخلیه کننده تحتانی با حضور صفحات مورب در فلاشینگ تحت فشار می باشد. نصب صفحات مورب بالادست تخلیه کننده تحتانی در فلاشینگ تحت فشار می تواند منجر به توسعه ناحیه کم فشار و افزایش گردابه های برخاستگی شده و در نتیجه حجم رسوبات خروجی را به مقدار قابل توجه افزایش دهد. نکته قابل توجه در این خصوص این است که در فلاشینگ تحت فشار مقدار رسوبات خروجی کم و محدود به ناحیه اطراف تخلیه کننده تحتانی می باشد. تاسیسات جانبی مانند تخلیه کننده تحتانی، خروجی نیروگاه و غیره در نزدیکی بدنه سد قرار داشته و ورود رسوب به این تاسیسات می تواند آثار مخربی به همراه داشته باشد. لذا ارائه راهکارهایی به منظور افزایش خروج رسوبات از نزدیک بدنه سد می تواند بسیار سودمند باشد. همچنین به دلیل ایجاد ناحیه کم فشار مقابل تخلیه کننده تحتانی یک حالت مکش ایجاد شده که می تواند در افزایش حجم رسوبات تخلیه شده هنگام وقوع جریان غلیظ در زمان سیلاب سودمند باشد.

## تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH1401.31370) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می گردد.

## منابع

## References

- Wen Shen, H. (1999). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 37(6), 743-757. <https://doi.org/10.1080/00221689909498509>
- Shammaa, Y., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N. (2005). Flow upstream of orifices and sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 127-133. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(127\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(127))
- Emamgholizadeh, S., & Fathi-Moghdam, M. (2014). Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4), 674-681. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000859](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000859)
- Bryant, D. B., Khan, A. A., & Aziz, N. M. (2008). Investigation of flow upstream of orifices. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 98-104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:1\(98\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(98))
- Meshkati, M. E., Dehghani, A. A., Naser, G., Emamgholizadeh, S., & Mosaedi, A. (2009). Evolution of developing flushing cone during the pressurized flushing in reservoir storage. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, 1107-1111. [https://www.academia.edu/download/32092771/Venice\\_Italy\\_Paper.pdf](https://www.academia.edu/download/32092771/Venice_Italy_Paper.pdf)
- Powell, D. N., & Khan, A. A. (2015). Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014076. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000960](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000960)
- Jenzer Althaus, J. M., Cesare, G. D., & Schleiss, A. J. (2015). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet-induced flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000970](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000970)
- Madadi, M. R., Rahimpour, M., & Qaderi, K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.007>
- Madadi, M. R., Rahimpour, M., & Qaderi, K. (2017). Improving the pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study. *Water Resources Management*, 31, 4633-4647. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1770-y>
- Mahtabi, G., Karimi, S., & Mohamadiuon, M. (2018). Effect of the number of rows, height and arrangement of submerged vanes in flushing of dam reservoir. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 285-296. [10.22069/jwsc.2018.13203.2786](https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.13203.2786)
- Beyvazpour, A., Daryaee, M., & Kashefipour, S. M. (2021). Improvement of pressurized flushing efficiency by installing a single pile upstream of the orifice. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.011>
- Haghjoui, H., Rahimpour, M., Qaderi, K., & Kantoush, S. A. (2021). Experimental study on the effect of bottomless structure in front of a bottom outlet on a sediment flushing cone. *International Journal of Sediment Research*, 36(3), 335-347. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.11.002>

- Beiramipour, S., Qaderi, K., Rahimpour, M., Ahmadi, M. M., & Kantoush, S. A. (2021, October). Effect of submerged vanes in front of circular reservoir intake on sediment flushing cone. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 174, No. 5, pp. 252-266). Thomas Telford Ltd. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/jwama.20.00032>
- Powell, D. N., & Khan, A. A. (2012). Scour upstream of a circular orifice under constant head. *Journal of hydraulic research*, 50(1), 28-34. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.637821>
- Shahriari, R., Daryaei, M., & Kashefipour, S. M. (2022). The effect of a plate installation upstream of an orifice on the pressurized flushing efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(5), 696-705. <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/cjce-2020-0828>
- Najafi, N., Daryaei, M., & Kashefipour, S. M. (2022). Enhancement of flushed sediment in pressure flushing using inclined plates upstream of orifice. *Water Supply*, 22(10), 7701-7712. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.340>
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A., & Azamathulla, H. M. (2013). Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(22), 9324-9337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2013.04.041>
- Naderi, S., Daryaei, M., Kashefipour, S. M., & Zayeri, M. (2022). Numerical and Experimental Study of Flow Pattern due to a Plate Installed Upstream of Orifice in Pressurized Flushing of Dam Reservoirs. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(6), 4593-4603. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40996-022-00896-9>