Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 55-73

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation the effect of aspect ratio of shallow reservoirs on distribution of suspended sediment concentration

M. Afrashteh[1] and B. Lashkar-Ara[2*]

1- Master Geaduate, , College of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
2- Corresponding Author, Assistant Professor, College of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran (Lashkarara@jsu.ac.ir).*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 23 September 2023
Revised: 23 November 2023
Accepted: 26 November 2023
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Shallow reservoirs, sedimentation, aspect ratio, reservoir geometry.

TO CITE THIS ARTICLE:

Afrashteh, M., Lashkar-Ara, B. 2025. 'Investigation the effect of aspect ratio of shallow reservoirs on distribution of suspended sediment concentration', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 55-73. doi: 10.22055/jise.2025.44838.2094.

Abstract

Sedimentation in settling basins is one of the significant challenges in water resource management. This phenomenon can lead to sediment accumulation in water reservoirs, reduced storage capacity, increased flood risks, and water pollution. Therefore, understanding the processes governing sedimentation in basins and optimizing the design of these structures is of great importance. In this research, the impact of aspect ratio (length to width ratio) of the reservoir on the distribution of suspended sediment concentration under free flow conditions has been investigated. Using rectangular tanks with aspect ratios of 1, 2, and 4, the sedimentation rate under various hydraulic conditions was evaluated. This parameter is recognized as one of the most critical factors affecting flow patterns and sediment deposition in settling basins. The results indicated a direct relationship between the aspect ratio of the reservoir and the distribution of suspended sediment concentrations. Specifically, reservoirs with higher aspect ratios (such as a tank with an aspect ratio of 4) retain greater amounts of suspended sediments on their surfaces. Additionally, in settling basins with high aspect ratios, the lateral spreading of dense flow creates a more favorable condition for uniform sediment distribution compared to its longitudinal spreading. Conversely, in basins with lower aspect ratios, greater longitudinal spreading occurs, increasing the likelihood of backflow formation. These findings demonstrate that considering the aspect ratio as a key parameter in the design of settling basins can significantly enhance the performance and efficiency of these structures in sediment management.

Introduction

Sediment accumulation in shallow reservoirs is considered one of the main challenges in water resource management (Lai and Shen, 1996). Accumulated sediments can reduce the reservoirs' capacity and increase environmental hazards (Kantoush and Schleiss, 2009). A precise understanding of the hydraulic processes governing suspended sediments and the impact of reservoir geometry on these processes is essential for optimal design (Dufresne et al., 2010). In this study, the effect of the aspect ratio of the reservoir on the distribution of suspended sediments is investigated with the aim of providing effective solutions to reduce problems arising from sedimentation.

Methodology

In this research, the impact of the aspect ratio of settling basins on the distribution of suspended sediment concentration was examined using Flow-3D software. Three-dimensional models with aspect ratios of 1, 2, and 4 were simulated, and the governing equations for free water flow were solved using the finite volume method. A scalar add-on was utilized to calculate the sediment concentration distribution, incorporating the high-precision transport and diffusion of scalars within the computational grid. The accuracy of the model was evaluated by comparing simulation results with laboratory data, confirming that this approach has the capability to accurately predict concentration distribution patterns and enhance the design performance of settling basins.

Results and Discussion

The analyses revealed that as the aspect ratio of the basins increased (1, 2, and 4), the flow and sedimentation patterns changed. At higher ratios, the lateral expansion of the flow and the accumulation of sediments near the sidewalls increased. In contrast, the distribution of sediments along the longitudinal direction became more uniform. Additionally, backflow and sediment accumulation were more pronounced in basins with higher aspect ratios, which contributed to improved control of incoming sediments.

The results are analyzed based on aspect ratios and the relative time scale t/t_0. For an aspect ratio of 1, at t/t_0=0.5, the dense flow is concentrated in the first quarter of the basin's length, with sediment largely limited to the inflow area. By t/t_0=1, the flow reaches half of the basin, but sediment distribution remains confined, with an increase in concentration in the middle section. At t/t_0=1.5, sediment distribution begins to become more uniform, although the end section of the basin has not fully engaged. At t/t_0=2, sediments reach the end of the basin, marking the beginning of backflow. By t/t_0=3, significant sediment accumulation occurs at the end, accompanied by clear backflow. Finally, at t/t_0=5, the basin is completely filled with sediment, and backflow reaches its maximum intensity.

For an aspect ratio of 2, similar patterns emerge. At t/t_0=0.5, the dense flow advances to one quarter of the basin length, with sediments concentrated at the inflow. At t/t_0=1, the flow reaches halfway, increasing sediment concentration in the middle. At t/t_0=1.5, the flow approaches the end area, distributing sediments more evenly along the basin's length. By t/t_0=2, backflow begins, bringing sediments closer to the outflow area, and at $t/t_{0=}$3, the distribution of sediments becomes more uniform, accompanied by intensified backflow. Eventually, the basin is completely filled with sediment, and the backflow stabilizes.

In the case of an aspect ratio of 4, at t/t_0=0.5, the dense flow only occupies part of the basin's length, with sediments focused near the inflow. At t/t_0=1, the flow reaches the midpoint, with sediment distribution still concentrated in the initial half. As time progresses to t/t_0=1.5, the flow approaches the outflow area, distributing sediments throughout the basin. When t/t_0=2, backflow initiates, with noticeable sediment accumulation in the end and lateral areas. By t/t_0=3, sediment distribution becomes uniform, and backflow intensifies. Finally, at t/t_0=5, the basin is fully filled with sediment, and backflow peaks.

Overall, these analyses indicate that an increase in aspect ratio leads to a more uniform distribution of sediments and improved control of flow within the basin. The performance of sedimentation ponds with different shape factors and the various stages of dense flow progression, return flow, and sediment accumulation are displayed in Figure (1).

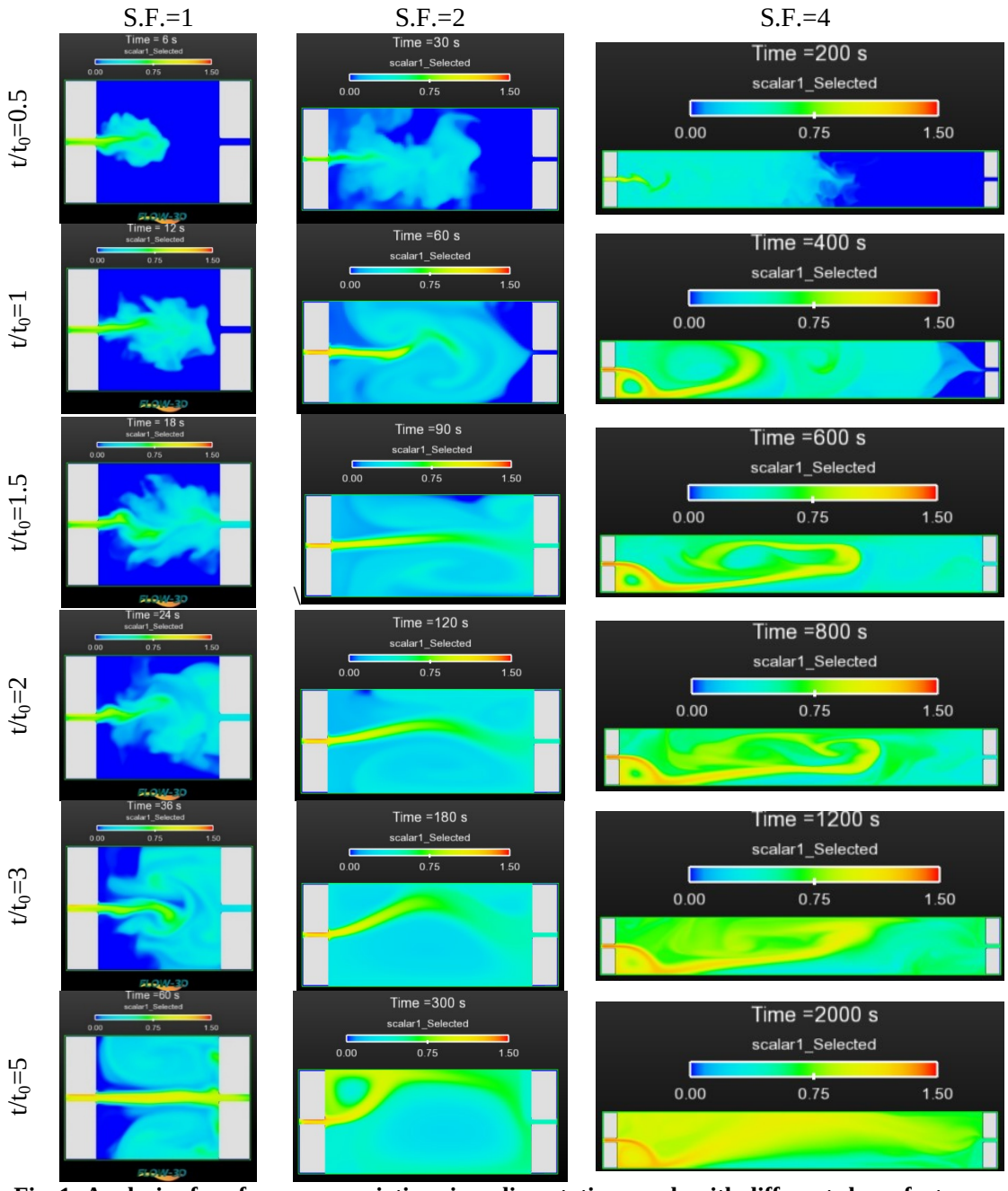


Fig. 1- Analysis of performance variations in sedimentation ponds with different shape factors: Instantaneous phase of dense flow progression, return flow phase, and sediment accumulation phase at various relative time intervals.

Conclusion

The analyses have demonstrated that the aspect ratio of the reservoir significantly impacts the distribution of dense flow. An increase in the aspect ratio leads to improved uniformity in sediment distribution both along and across the reservoir, as well as a reduction in localized concentrations. Furthermore, the development of backflow and sediment control in the end areas operates more effectively, particularly at higher ratios, such as in reservoirs with an aspect ratio of 4. These findings highlight that designing sedimentation basins with higher aspect ratios can enhance the structural

efficiency in sediment management and maintain hydraulic performance, thereby minimizing unwanted blockages and sedimentation. Overall, these results underscore the importance of selecting the appropriate aspect ratio in the design and optimization of sedimentation basins, which can significantly improve their operational quality.

Acknowledgments

The authors of this article would like to express their sincere gratitude to the Jundi-shapur University of Technology, Dezful in Iran for their collaboration in the preparation of this article.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Mihammad Afrashteh, Data analysis, interpretation of results, writing – original draft.
Second Author: Babak Lashkar-Ara, Supervisor, data analysis, validation, discussion, writing – review & editing, and final approval.

References

1- Lai, J.S. and Shen, H.W., 1996. Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), pp.237-255. https://doi.org/10.1080/00221689609498499.

2- Kantoush, S., 2007. Symmetric or asymmetric flow patterns in shallow rectangular basins with sediment transport. In *Proceedings of the 32nd Congress of IAHR*. https://hdl.handle.net/20.500.11970/110019.

3. Dufresne, M., Dewals, B.J., Erpicum, S., Archambeau, P. and Pirotton, M., 2010. Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. International *Journal of Sediment Research*, 25(3), pp.258-270. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60043-1.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۳، پاییز ۱٤۰٤، مقاله پژوهشی، ص. ۷۳-۵۵

بررسی اثر نسبت ظاهری مخازن کم عمق بر میزان توزیع غلظت رسوبات معلق

محمد افراشته[۱] و بابک لشکرآرا[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول. (Lashkarara@jsu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ته‌نشینی یکی از چالش‌های مهم و اساسی در مدیریت منابع آبی است. این پدیده می‌تواند به انباشت رسوبات در مخازن آبی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی، افزایش خطرات سیلاب و نیز آلودگی آب منجر شود. بنابراین، شناخت فرآیندهای حاکم بر رسوب‌گذاری در حوضچه‌ها و مخازن و بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها اهمیت به‌سزایی دارد. در این پژوهش، تأثیر نسبت ظاهری (نسبت طول به عرض) مخزن بر توزیع غلظت رسوبات معلق تحت شرایط جریان آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از مخازن مستطیلی با نسبت‌های ظاهری یک، دو و چهار، میزان رسوب‌گذاری در شرایط هیدرولیکی متفاوت ارزیابی شده است. این پارامتر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر الگوی جریان و رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ته‌نشینی شناخته شده است. نتایج نشان داد که نسبت ظاهری مخزن با توزیع غلظت رسوبات معلق ارتباط مستقیم دارد. به‌طوری که مخازن با نسبت ظاهری بالاتر (مانند مخزن با ضریب شکل ٤) میزان بیشتری رسوبات معلق را در سطح خود نگه‌می‌دارند. همچنین، در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل بالا، گسترش عرضی جریان چگال نسبت به گسترش طولی آن وضعیت مطلوب‌تری از نظر توزیع یکنواخت رسوبات ایجاد می‌کند. در مقابل، در حوضچه‌های با ضریب شکل پایین، گسترش طولی بیشتر و احتمال تشکیل جریان‌های برگشتی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که توجه به نسبت ظاهری به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی این سازه‌ها در مدیریت رسوبات کمک شایانی بنماید.

کلید واژه‌ها: مخازن مستطیلی، رسوب پذیری، الگوی جریان، جریان برگشتی.

مقدمه

معضل رسوب‌گذاری همواره به‌عنوان مهمترین عامل در کوتاه کردن عمر مفید سدها مطرح بوده است و سدهای زیادی به‌دلیل پر شدن از رسوب متروکه شده‌اند. این مشکل به‌ویژه در مناطق استوایی و نیمه خشک به علت بالا بودن دبی جریان رسوب مشهودتر به نظر می‌رسد.

رسوب‌گذاری در سدهای با مخزن عمیق و کم عمق باعث از دست رفتن حجم مفید آن شده و از این رو اهمیت افزایش عمر مفید سدها و حفظ حجم ذخیره آن‌ها برای تداوم کنترل و بهره‌برداری از منابع آب در اولویت برنامه ریزان مدیریت منابع آب کشورها قرار گرفته است. چرا که ساخت سدهای جدید به دلایل آیین نامه‌های سخت گیرانه محیط زیستی، هزینه بالای ساخت و عدم وجود سایت‌های مناسب بسیار مشکل می‌باشد (Lai, 1996). لذا با توجه به اهمیت مساله، کمیته بین المللی سدهای بزرگ یکی از مسائل مهم جهان را در قرن حاضر، مسئله رسوب‌گذاری در سدها دانسته و تأسیس کمیته بین‌المللی رسوب‌گذاری در مخازن در سال ۱۹۹۲ به‌دلیل اهمیت این مسئله می‌باشد. رسوب‌گذاری در مخازن سدهای ساخت بشر، یکی از مشکلات بسیار جدی در مهندسی سدسازی می‌باشد. بنابراین مدیریت رسوب در مخازن سدهای موجود امری ضروریست. اغلب اوقات مدیریت رسوب در تضاد با مدیریت منابع آب می‌باشد. برای مثال برای تولید الکتریسیته بیشتر نیاز است. رقوم سطح آب مخزن بالا نگه داشته شود که این امر موجب افزایش رسوب‌گذاری در مخزن می‌گردد.

علاوه بر این، بررسی‌های انجام‌شده در زمینه‌ی برآورد بار رسوب معلق نشان می‌دهد که دقت تخمین بار رسوبی می‌تواند به‌طور مستقیم بر تحلیل هیدرولیکی جریان اثرگذار باشد؛ موضوعی که در ارزیابی معادلات انتقال رسوب نیز تأیید شده است (Lashkar-Ara & Kiani, 2025).

برای رفع مشکل رسوب‌گذاری از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. به‌طور کلی راه حل‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن سدها را می‌توان شامل عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک، استفاده از روش‌های هیدرولیکی مانند عبوردهی جریان غلیظ، عبور دهی رسوبات و رسوب‌شویی بیان کرد. علاوه بر موارد فوق استفاده از روش‌های کمکی مانند لایروبی، سیفون کردن، سیستم کنارگذر نیز در زمره روش‌های رسوب زدایی از مخازن قرار دارد. مشکلی که طراح با آن روبه‌رو است تخمین میزان رسوب و مدت زمانی است که رسوب در عملکرد مفید مخزن اخلال ایجاد می‌کند.

رسوب‌گذاری در مخزن از سال ۱۹۳۰ مورد بررسی قرار گرفته است رسوب نه تنها ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن را کاهش می‌دهد بلکه احتمال طغیان سیل را در قسمت بالا دست به‌دلیل افزایش ارتفاعات بستر رودخانه در انتهای بالا دست مخزن افزایش می‌دهد (Liu et al, 2004). به‌منظور حذف و کاهش رسوبات مخزن،

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

روش‌های مختلفی مانند فلاشینگ، لایروبی، هیدروساکشن، لوله کنار گذر و حفاظت از آب و خاک تدوین شده است (Goodland, 1989 & Abasi Zade Bagheban and Lashkar-Ara, 2020 & Aryaei and Lashkar-Ara., 2023)

مخازن کم عمق ناگزیر هستند در برابر ورود برخی رسوبات به مخزن برای تعادل مورفودینامیکی جریان اصلی، تغییراتی در مشخصات هیدرولیکی جریان و انتقال رسوب داشته باشند (Kantoush and Schleiss, 2009).

معیارهای طراحی مخازن کم عمق به اهداف کاربرد آن‌ها بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به آبیاری، کنترل سیل، تولید برق اشاره نمود. همچنین در این مخازن باید میزان فرایند ته نشینی رسوبات در یک سطح حداقل طراحی گردد. پیش‌بینی رسوب در مخازن کم عمق بسیار پیچیده بوده و به‌دلیل شکل هندسی مخزن، شرایط هیدرولیکی و مشخصات جریانات رسوبات وارده به مخزن، نیازمند مطالعه‌های هیدرولیکی بیشتری است (Dufresne et al., 2010).

مطالعه‌های پیرامون خصوصیات فیزیکی و رفتار رسوبات چسبنده نشان می‌دهد که لخته‌سازی عاملی کلیدی در پیچیدگی انتقال این نوع رسوبات است (Shadorvan et al., 2018).

از جمله عوامل مؤثر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات و همچنین میزان و نحوه توزیع رسوبات در مخازن می‌توان به محل قرار گیری سد در مخزن، وجود خلیج‌ها، باز شدگی‌ها و تنگ شدگی‌ها در مخزن، شیب کف مخزن، تعداد محل‌های ورود جریان به مخزن و اندازه و خصوصیات ذرات رسوبی وارد شده به مخزن اشاره نمود (Asghari Pari et al., 2010 & Goudarzi et al., 2021)

اهمیت مخازن کوچک مربوط به حجم ذخیره آب آن‌ها می‌باشد و به دلایل مختلف امکان کاهش عمر مفید این مخازن وجود دارد. (Michalec, 2008).

در هنگام عملیات فلاشینگ الگوی جریان خروج مواد رسوبی از مخزن با الگوی جریان ورودی با آن متفاوت می‌باشد و برای کنترل رسوب در مخازن لازم است که رویکردهایی مانند لایروبی، و فلاشینگ را در دست مطالعه داشت. فلاشینگ به‌عنوان یک روش کارامد در خروج رسوبات از مخزن می‌تواند بیشتر مدنظر قرار بگیرد (Morris and Fan ,1998)

گزارش‌هایی نیز در خصوص بررسی کارایی هوش مصنوعی در تأثیر ورود هوا بر عمق فرسایش ناشی از جت‌های خروجی از سازه‌های هیدرولیکی منتشر شده است (Lashkar-Ara et al., 2020)

در آزمایش‌هایی که بر روی کانال‌های با مقاطع متفاوت انجام گردید مشاهده شدکه عملیات فلاشینگ تحت فشار با ابعاد هندسه کانال در ارتباط مستقیم می‌باشد. همچنین میزان عمق جریان و میزان سرعت در راندمان فلاشینگ تحت فشار در کانال‌ها تأثیر گذار است و فلاشینگ تحت جریان آزاد فقط دارای اثر موضعی بوده و مقدار کمی از رسوبات را تخلیه می‌نماید (Kantoush and Schleiss, 2009).

محققین زیادی در رابطه با برآورد بار رسوبی و تأثیر آن بر هیدرولیک جریان تحقیق نموده‌اند. و معتقدند که یکی از مهمترین ابزارها برای پیش‌بینی بار رسوبی استفاده از منحنی‌های سنجه- رسوب است اما به‌دلیل تغییرات فصلی بارندگی، پوشش گیاهی، جریان رودخانه و غیره منحنی سنجه- رسوب نیز ممکن است در هر فصل تغییر کند. بنابراین در استفاده از این روش برای تعیین بار رسوبی می‌بایست شرایط مذکور را مدنظر قرار داد. لذا لزوم نمونه‌گیری در شرایط شدت بالای جریان امری بسیار ضروری می‌باشد چرا که گاهی۵۰-۸۰ درصد بار رسوبی سالیانه در جریان‌های با شدت بالا حمل می‌شود.

استفاده از منحنی سنجه رسوب و رابطه رگرسیونی، مقدار میانگین بار رسوبی محاسبه شده بدین روش را تقریباً ۲۰ برابر کوچک‌تر از میانگین بار رسوبی داده‌های اندازه‌گیری شده را نمایش می‌دهد که دلیل آن را عدم وجود اندازه‌گیری بار رسوب در دبی‌های پایین عنوان نمودند و معتقدند که معادله معروف سنجه-رسوب بیشتر برای شرایط غیرعادی با دبی بالا معتبر است در ضمن این محققین بر اندازه‌گیری بار بستر علی‌رغم مشکل بودن روش و غیرحتمی بودنش تأکید فراوان داشتند چرا که میزان باربستر یکی از پارامترهای مهمی است که می‌بایست به مقدار بار معلق اضافه شود. (lee et al., 2005).

مهندسین هیدرولیک و زمین شناس طی دو قرن اخیر، حرکت مواد رسوبی در رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند، چرا که رفتار مواد رسوبی، در هیدرولیک رودخانه و تغییر مورفولوژی آن، حائز اهمیت است. طبیعت پیچیده انتقال رسوب و وابستگی آن به شرایط طبیعی، علم انتقال رسوب را به رشته‌های تجربی یا نیمه تجربی تبدیل کرده است. روابط و معادله‌هایی که به بررسی حرکت مواد رسوبی می‌پردازند اغلب، براساس مفاهیمی بنا شده‌اند که در تعیین آن‌ها، فرضیه‌های ساده‌ای صورت گرفته است. این ساده کردن فرضیه‌ها و نادیده گرفتن برخی جزئیات محققین را قادر ساخته تا نرخ انتقال رسوب را به کمک یک یا دو شاخص هیدرولیکی رودخانه تعیین کنند از جمله این شاخص‌ها می‌توان به دبی آبراهه، سرعت متوسط جریان، شیب خط انرژی و تنش برشی اشاره کرد. هر یک از این روابط براساس یک سری نتایج آزمایشگاهی محدود یا در بعضی موارد بر طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی بر روی آبراهه‌ها ارائه شده‌اند. به لحاظ ماهیت تجربی و یا نیمه تجربی این روابط، نتایج حاصل از آن‌ها غالباً با هم متفاوتند و این نتایج بعضاً با آنچه که به واقع در آبراهه‌ها مشاهده می‌شود نیز تفاوت‌های فاحشی دارند. در نتیجه، هیچ یک از معامله‌های انتقال رسوب ارائه شده تاکنون نتوانسته‌اند کاملاً در مجامع مهندسی پذیرفته شوند. چرا که هیچ یک قادر به تخمین و محاسبه دقیق نرخ انتقال رسوب نیستند. این عدم دقت در نتایج حاصل از معادله‌ها در رودخانه‌هایی که تحت تأثیر شرایط خاص جوی و طبیعی قرار دارند، آشکارتر است.

مواد و روش‌ها

معادله‌های حاکم بر جریان

در این قسمت به بررسی تفصیلی در مورد دینامیک سیالات محاسباتی، انواع روش‌های عددی و معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی پرداخته شده و در انتها با معرفی نرم‌افزار Flow-3D به تشریح معادله‌های کلی حاکم بر جریان سیال، معادله‌های حاکم بر جریان آشفته، روش حجم سیال، روش کسر مساحت و حجم مانع به کار رفته در نرم‌افزار پرداخته خواهد شد.

برخی از معادله‌های انتقال رسوب که به‌طور مدام و پیوسته در حال تغییر، تکمیل و افزایش‌اند و روابط ریاضی مربوطه که در نرم‌افزار مورد نظر استفاده شده است در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- روابط انتقال رسوب معلق در جریان های کانال روباز

Table 1- Suspended Sediment Transport Equations for Open Channel Flows

Researcher's names	Eq	Description
Rouse (1937)	$\frac{c}{c_a}=(\frac{d-y}{y}\times\frac{y}{d-a})^z$ $z=\frac{\omega}{ku_*}$	C: concentration of suspended sediments at the desired depth. C_a: initial concentration of suspended sediments. d: flow depth. ω: settling velocity of particles. k: Von Karman coefficient. u_*: shear velocity. z: Rouse number.
Liu, H. K. (1958).	$C=C_p.(q-\frac{v}{a})\exp(\frac{\gamma_s v.a}{y})$	C: Concentration of suspended sediments at a specific depth. C_p : Concentration of suspended sediments at the water surface or reference point. q: Current flow rate a: Empirical coefficient. v: Flow velocity. γ_s: Density of sedimen. y: depth of the system being studied.
Brooks equation (1965)	$\frac{q_s}{\gamma_w.q.C_{md}}=f(k\frac{V}{u_*},z)$	q_s: suspended load per unit width. γ_w: specific weight of water. q: flow rate per unit width. C_{md}: weight concentration at a distance of 0.5d from the bed. f: function. V: average flow velocity. k: Von Karman coefficient. u_*: shear velocity. z: Rouse number.
Van Rijn (1984)	$C=k\frac{D_s^3}{\upsilon}(\frac{\gamma_s-\rho}{\rho})(\frac{q^{\frac{3}{2}}}{d^{\frac{1}{2}}})$	C: Suspended load flow rate k: The experimental coefficient. D_s: Diameter of sediment particles(m). γ_s: Density of sedimen. ϑ:Viscosity of water (usually in m^2/s). ρ: Density of water (usually in kg/m^3). q: flow rate per unit width. d: flow depth.

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

Flow-3D، نرم‌افزاری قوی در زمینه‌ی مکانیک سیالات می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت Flow Science Inc. صورت گرفته است. این نرم‌افزار برای تحقیق در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده‌ی کاربردی وسیعی طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های عمده‌ی این برنامه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد به روش VOF می‌باشد.

Flow-3D شامل الگوهای فیزیکی مختلفی می‌باشد که برخی از آن‌ها عبارتند از: آب‌های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفتگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل. این مدل‌ها در زمینه‌هایی مانند ریخته‌گری مواد، مهندسی فرآیند، هیدرولیک، مهندسی محیط زیست، هوا فضا، علوم دریایی و نفت و گاز کاربرد دارد. برای استفاده از این نرم‌افزار به یک پردازنده‌ی Pentium(III) با ویندوز Xp احتیاج است. حداقل حافظه‌ی کارت گرافیک نیز ۳۲^{Mb} می‌باشد. این برنامه بر روی سیستم عامل Seven و Linux قابل نصب می‌باشد. از مزایای دیگر این نرم‌افزار، قابلیت شبکه کردن آن با سیستم‌های پردازنده‌ی دیگر است.

این نرم‌افزار در تحلیل مسائل جریان‌های با سطح آزاد قابلیت ویژه‌ای دارد. نرم‌افزار Flow-3D نیز مانند نرم‌افزار FLUENT از روش حجم محدود در محاسبات شبکه‌بندی منظم مستطیلی بهره می‌گیرد. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره‌ی حافظه احتیاج دارد. این نرم‌افزار از روش خاصی به نام FAVOR سود می‌برد و برای شبیه‌سازی هندسی از شبکه‌بندی مستطیلی استفاده می‌کند. در این روش برای هر حجم کنترل، مقدار فشار، سرعت، دما و... به صورت مجزا محاسبه می‌شود.

به‌منظور آشنایی با اساس کار نرم‌افزار به بیان معادله‌های حاکم بر جریان‌های آشفته خواهیم پرداخت. در جریان‌های تراکم ناپذیر، روابط (۱) و (۲) به‌ترتیب رابطه پیوستگی و اندازه حرکت را بیان می‌نمایند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_i\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+g_i+\nu\nabla^2 u_i \qquad (۲)$$

در روابط فوق u سرعت لحظه‌ای در جهت i، v لزجت سینماتیکی سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g_i مؤلفه شتاب ثقل در جهت i و p فشار در هر نقطه از سیال است. در تحلیل عددی جریان آشفته می‌توان از روابط فوق استفاده کرد اما باید بتوان نوسانات نامنظم و لحظه‌ای کمیت‌های میدان جریان را در هر لحظه و هر نقطه مدل نمود. اما چنانچه مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار یا هر کمیت دیگری مانند Φ را به مقدار متوسط و زمانی تفکیک شود.

به‌منظور حل از مدل تلاطمی LES استفاده شده است. ایده اساسی این مدل این است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شوند. زمانی که از مدل LES استفاده می‌شود باید دقت کرد که این مدل سه بعدی و وابسته به زمان است. علاوه بر این، نوسانات باید مقداردهی اولیه شوند و یا در مرزهای ورودی تعریف شوند. اگر چه این عمل نیازمند تلاش بسیار بوده و نیازمند هزینه محاسباتی بالا است ولی نتایجی که تولید می‌شود دارای جزئیات بیشتری نسبت به مدل‌های بر پایه متوسط گیری رینولدز است. در مدل LES اثرات آشفتگی که خیلی کوچکند و قابل محاسبه نیستند باید با یک لزجت آشفتگی، که متناسب است با یک مقیاس طول ضربدر معیاری از نوسانات سرعت در آن مقیاس، نمایش داده می‌شود. می‌توان از یک میانگین هندسی ابعاد سلول شبکه برای مقیاس طول استفاده کرد :

$$L=(\partial x\,\partial y\,\partial z)^{1/3} \qquad (۳)$$

و نوسانات سرعت را با حاصل‌ضرب بزرگی آن و تنش برشی متوسط مقیاس کرد. این کمیت‌ها برای ارائه لزجت گردابی سینماتیکی مدل LES با هم ترکیب می‌شوند:

$$V_T=(CL)^2\sqrt{e_{ij}\,e_{ij}} \qquad (۴)$$

به‌طوریکه C ضریب ثابتی در دامنه ۰/۱ تا ۰/۲ است و e_{ij} اشاره به مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش دارد.

برای حل معادله‌ها از افزونه اسکالر (Scalar) استفاده گردید. این بخش در قسمت فیزیک مدل شبیه‌ساز جریان می‌باشد که از آن در تمامی مدل‌های استاندارد استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان از مسائل آبشستگی و رسوب‌گذاری، ردیابی نقص‌ها در مدل، ورود هوا یا رصد زمان ماندن سیال یاد کرد. این اسکالرها زمانی که مدل‌های مربوطه آن‌ها فعال می‌شوند به‌طور خودکار تعریف می‌شوند. اسکالرهای تعریف شده می‌توانند توسط کاربر به‌عنوان یک نشان‌گر درون سیال، مشابه ذرات نشان‌گر، یا به‌عنوان بخشی از یک سفارشی‌سازی معرفی شوند (به‌عنوان مثال: شمارش غلظت ذرات در سلول‌های مش مدل).

اسکالر قابل انتقال معمولاً به‌عنوان غلظت بر حسب جرم در حجم سیال در سلول تعریف می‌شود. یک معادله انتقال به‌طور خودکار برای هر اسکالر قابل انتقال، تعریف شده توسط کاربر یا مدل حل می‌شود:

$$\frac{\partial C}{\partial T}+\frac{1}{V_F}[uA_x\frac{\partial C}{\partial x}+\upsilon A_y\frac{\partial C}{\partial y}+\omega A_z\frac{\partial C}{\partial z}] =\frac{1}{V_F}[\frac{\partial}{\partial x}(A_xD\frac{\partial C}{\partial x})+R\frac{\partial}{\partial u}(A_yDR\frac{\partial C}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(A_zD\frac{\partial C}{\partial y}] +C_{SOR} \quad (۵)$$

در ساده‌ترین حالت، اسکالرها بر دینامیک سیال تأثیر نمی‌گذارند. آن‌ها با جریان متوسط حرکت می‌کنند و با ضریب انتشار منتشر می‌شوند.

$$\rho D=RMSC.\mu+CMSC \quad (۶)$$

که D در آن ضریب انتشار است.

که در آن RMSC عدد اشمیت معکوس است، μ ویسکوزیته سیال دینامیکی، CMSC یک ضریب انتشار اسکالر ثابت است و ρ چگالی سیال است.

اسکالرها همچنین می‌توانند دارای ویژگی‌های خاصی باشند که بر ویژگی‌های سیال مانند چگالی، ویسکوزیته، مدول الاستیک و تنش تسلیم تأثیر می‌گذارند و قابلیت مدل‌سازی چندین ماده یا سیال با تغییرات موضعی خاص را فراهم می‌کنند. هنگامی که جرم اسکالر در محاسبه مخلوط سیال اسکالر گنجانده شود، به‌سادگی به جرم سیال اضافه می‌شود. به عبارت دیگر، اسکالرها همیشه به‌عنوان املاح بینابینی در نظر گرفته می‌شوند، زمانی که مولکول‌های آن‌ها کاملاً در فضاهای بین مولکول‌های حلال، یعنی سیال، قرار می‌گیرند. یک اسکالر فقط می‌تواند مایع را سنگین‌تر کند. سایر خواص مخلوط حمل شده توسط اسکالرها به‌عنوان میانگین جرمی سیال خالص و ویژگی‌های اسکالر محاسبه می‌شود. به‌عنوان مثال، برای یک اسکالر منفرد، ویسکوزیته مخلوط:

$$\mu_{mix}=[\rho\mu+\sum_i(C_i\mu C_i)]/(\rho+\sum_i(C_i)) \quad (۷)$$

که در آن چگالی و ویسکوزیته سیال خالص هست و ویسکوزیته‌ای که به اسکالر نسبت داده می‌شود. جمع بر روی تمام اسکالرهایی که به ویسکوزیته مخلوط کمک می‌کنند انجام می‌شود.

اسکالرها را می‌توان در شرایط اولیه، در مرزهای ورودی مش و در منابع سیال معرفی کرد. آن‌ها همچنین یک پلتفرم قدرتمند برای سفارشی‌سازی کاربر برای متناسب با نیازهای مدل سازی خاص ارائه می‌کنند.

حرکت اسکالر کسر سیال توسط معادله زیرکنترل می‌شود، تغییرات در یک سلول به مجموع شارهای بین صفحات سلول‌ها کاهش می‌یابد. با این حال، باید در محاسبه این شارها دقت ویژه‌ای صورت گیرد تا تعریف دقیق مرزهای سیال حفظ شود. روش به‌کار گرفته شده در اینجا از نوعی تقریب شار دهنده–پذیرنده استفاده می‌شود. ایده اصلی استفاده از اطلاعات در مورد پایین دست و همچنین بالادست یک مرز شار برای ایجاد یک شکل رابط تقریبی و سپس استفاده از این شکل در محاسبه شار است.

$$V_F\frac{\partial\Phi}{\partial t}+\nabla.(uA\Phi)=RHS \quad (۸)$$

روش اساسی توسعه یافته برای استفاده در روش حجم سیال فاصله که در اینجا استفاده می‌شود، ممکن است با در نظر گرفتن مقدار شار در جهت x از طریق صفحه سلول در طول یک مرحله زمانی از مدت زمان درک شود. شار حجمی که از این وجه عبور می‌کند در واحد سطح مقطع برابر است، جایی که سرعت عادی در سطح و ناحیه باز برای جریان است. علامت سلول‌های دهنده و گیرنده را مشخص می‌کند، یعنی سلول‌ها به‌ترتیب حجم خود را از دست می‌دهند و افزایش می‌دهند. به‌عنوان مثال، اگر مثبت باشد، سلول بالادست یا چپ اهداکننده و سلول پایین دست یا راست گیرنده است. مقدار شار در سطح سلولی در یک مرحله زمانی به‌عنوان ضربات سطح مقطع صورت بدون مانع (δ_y,δ_z) تعریف می‌شود، از آن جایی که براساس معادله‌های (۹) و (۱۰) بیان می‌گردد.

$$\delta F=MIN(F_{AD}|L|+CF,F_DV_{F,D}\,\delta_{x,D} \quad (۹)$$

$$CF=MAX(F_{DM}-F_{AD})|L|-(F_{DM}-F_D) V_{F,F}\,\delta_{xD},\circ.\circ] \quad (۱۰)$$

زیرنویس‌های منفرد نشان دهنده سلول‌های گیرنده (A) و دهنده (D) هستند.

به‌طور خلاصه، ویژگی در معادله (۱۰) از شار F بیشتر از سلول اهداکننده جلوگیری می‌کند، در حالی که این ویژگی یک شار اضافی را به حساب می‌آورد، اگر مقدار خالی (1-F) که باید شار شود از مقدار خالی موجود بیشتر می‌شود. سری شکل‌های زیر توضیح تصویری معادله را ارائه می‌دهد. سلول‌های دهنده و گیرنده در شکل (*a*) مشخص می‌باشد شکل (۱) برای حرکت در سطح سلول‌های عمودی تعریف شده‌اند. آرایش دهنده–گیرنده در (a) نشان داده شده است که در آن خط چین مرز سمت چپ حجم کل در حال انتقال را نشان می‌دهد. مناطق سایه‌دار نشان داده شده در (b-d) مقادیر واقعی شار هستند. در قسمت (c) شکل پایین، تمام سیال در سلول اهداکننده شار شده است زیرا هر چیزی که بین خط چین و مرز شار قرار دارد به سلول گیرنده حرکت می‌کند. اینکه از سلول گیرنده یا دهنده استفاده شود به جهت‌گیری سطح متوسط بستگی دارد. سلول پذیرنده زمانی استفاده می‌شود که سطح در جهتی عادی به خودش برمی‌گردد. در غیر این صورت، از مقدار سلول دهنده استفاده می‌شود. با این حال، اگر سلول پذیرنده خالی باشد یا اگر سلول

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

بالادست سلول اهداکننده خالی باشد، از مقدار سلول پذیرنده برای تعیین شار بدون توجه به جهت سطح استفاده می‌شود. این بدان معنی است که قبل از اینکه هر مایعی بتواند وارد سلول خالی پایین دست شود، یک سلول اهداکننده باید تقریباً پر باشد.

هنگامی که شار با روش فوق محاسبه شد، در ناحیه مرزی شار ضرب می‌شود تا مقدار سیالی که باید از سلول دهنده کم شود و به سلول پذیرنده اضافه شود، به‌دست می‌آید. به این ترتیب حجم سیال تعریف شده توسط حفظ می‌شود. هنگامی که فرآیند فرارفت برای تمام مرزهای سلول در مش تکرار می‌شود، مقادیر به‌دست آمده با مقادیر پیشرفته زمان مطابقت خواهد داشت.

شبیه‌سازی جریان

در این تحقیق به بررسی نسبت ظاهری شکل مخزن بر توزیع میزان غلظت رسوبات معلق تحت شرایط جریان آزاد پرداخته شده است. برای این منظور از یک مخزن مستطیلی با نسبت ظاهری مختلف استفاده گردید و میزان توزیع غلظت رسوبات معلق تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای تهیه‌ی هندسه‌ی مدل از امکانات ترسیمی خود نرم‌افزار استفاده شده است. در این نرم‌افزار، مدل سه بعدی ترسیم و با فرمت (*.stl) ذخیره شده است. در شکل (۲) مدل مخازن مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است:

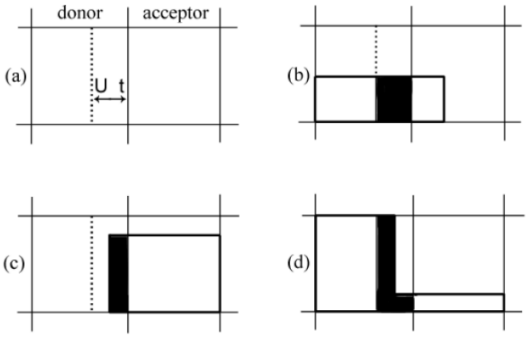


Fig. 1- Examples of free-surface shapes used in the advection of F. The donor-acceptor arrangement is shown in (a) where the dashed line indicated the left boundary of the total volume being advected. The shaded regions shown in (b-d) are the actual amounts of F fluxed.

شکل ۱- نمونه‌هایی از اشکال سطح آزاد که در جابه‌جایی F استفاده شده‌اند. ترتیب اهدایی-پذیرنده در قسمت (a) نشان داده شده است که در آن خط چین مرز سمت چپ کل حجم جابه‌جا شده را مشخص می‌کند. مناطق سایه‌دار در قسمت‌های (b-d) مقدار واقعی جابه‌جایی F را نشان می‌دهند

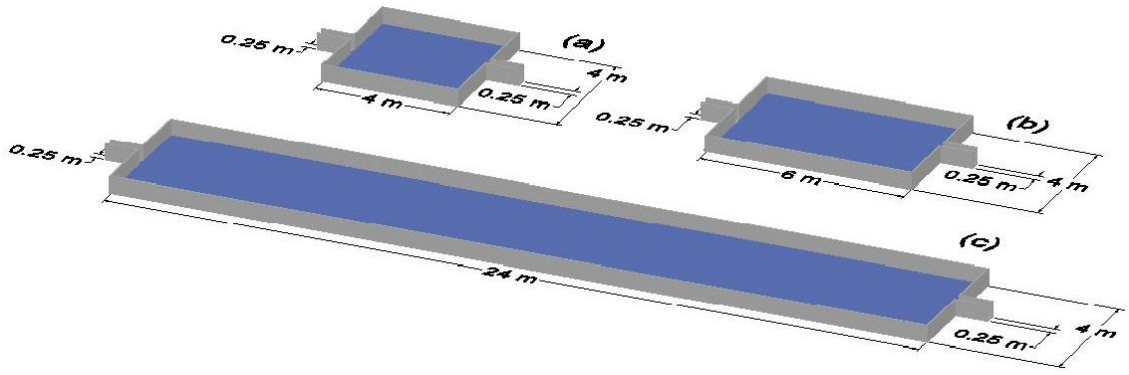


Fig. 2- Geometric shape and dimensions of the models used in this study: a) S.F.=1, b) S.F.=2, and c) S.F.=4

شکل ۲- شکل و ابعاد هندسی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق: الف) S.F.=1، ب) S.F.=2 و ج) S.F.=4

در گام بعد برای ایجاد یک شبکه محاسباتی، از یک بلوک تک به‌صورت یکپارچه که مدل را احاطه نموده استفاده شده است. هر مش‌بندی در نرم‌افزار دارای دو گزینه اندازه سلول (Cell Size) و تعداد سلول (Cell Count) می‌باشد. که اعداد درج شده در کادرهای مربوطه به‌ترتیب برابر اندازه سلول‌های محاسباتی و تعداد کل سلول‌های محاسباتی می‌باشد. برای شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده و یا زمانی که نیاز به وجود میدان‌های حل با سلول‌های ریزتر می‌باشد می‌توان برای کاهش حجم محاسبات از چند شبکه حل (مش پنل) مجزا یا تو در تو استفاده نمود.که البته در این تحقیق در تمامی مراحل از یک شبکه حل با تعداد سلول‌های مورد نیاز که براساس تست‌های متفاوت انجام گرفته شده و مورد نیاز استفاده شده است. البته باید قبل از ورود به مرحله انجام حل تست نسبت اندازه و شکل سلول‌ها انجام گیرد که در ذیل به نحوه انجام این تست پرداخته شده است.

طبق تعریف، نسبت اندازه سلول‌ها عبارت است از نسبت ابعاد دو سلول مجاور هم در یک امتداد خاص ونسبت شکل عبارت است از نسبت بزرگترین بعد یک سلول به کوچکترین بعد آن.

اندازه دو نسبت مذکور بسیار مهم بوده و محدودیت‌هایی در اندازه آن‌ها وجود دارد. در تعریف یک بلوک از میدان حل، حداکثر مقدار نسبت اندازه سلول‌های مجاور هم و نسبت شکل آن‌ها باید کنترل گردد برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه‌سازی، باید نسبت اندازه دو سلول مجاور تا حد ممکن نزدیک به یک باشد و حداکثر از ۱/۲۵ تجاوز نکند. همچنین نسبت شکل نیز تا حد ممکن نزدیک یک باشد و حداکثر از سه تجاوز نکند. در کل مدل سازی‌های انجام شده در این تحقیق تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی به نحوی تعیین گردید که نسبت اندازه دوسلول بین ارقام یک الی ۱/۰۵ می‌باشد و همچنین نسبت شکل بین ارقام یک الی ۱/۲ محدود بوده است. حساسیت به شبکه‌بندی و انفصال میدان حل، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی بوده است. در همین زمینه الگوهای شبکه‌بندی مختلفی ارائه شده است که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود هستند. Flow-3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی نحوه‌ی برخورد متفاوتی در مقایسه با سایر بسته‌های نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دارد. Flow-3D از روش کسر مساحت–حجم مانع استفاده می‌کند. در این روش، شکل نهایی موانع به شبکه‌ی ساخته شده در اطراف آن‌ها بستگی دارد. اگر سطح مانع دارای لبه‌های تیز، مقعر و یا محدب باشد ممکن است محل تقاطع چندگانه به وجود آید. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که یک پاره خط شبکه بیش از یکبار توسط مانع قطع شود. در چنین حالتی قسمت واقع شده در یک سلول در تشکیل جسم مورد نظر توسط نرم‌افزار شناسایی نمی‌گردد و مطابق شکل (۳)، شکل‌های سمت چپ به فرم شکل‌های سمت راست در می‌آید. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه‌ی اندازه‌های سازه‌ی مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌شود. می‌توان تمام جزئیات مورد نظر را در یک بلوک هم در نظر گرفت.

یکی از قابلیت‌های کلیدی نرم‌افزار Flow-3D، امکان تقسیم میدان محاسباتی به چندین بلوک است که در هر بلوک با توجه به شرایط خاص، از مش مناسب استفاده می‌شود. هر بلوک نماینده بخشی از میدان محاسباتی است و این تقسیم‌بندی می‌تواند به دو روش انجام شود: با استفاده از بلوک‌های متوالی که در کنار یکدیگر قرار گرفته و هیچ‌گونه هم‌پوشانی ندارند، یا با بهره‌برداری از بلوک‌های درهم که در این حالت، یک بلوک به‌طور کامل درون بلوک دیگری قرار می‌گیرد. مقادیر کمیت‌ها با روش عددی در هر بلوک محاسبه می‌شوند؛ سپس این مقادیر از یک بلوک به بلوک دیگر با استفاده از درون‌یابی منتقل می‌شوند به شکلی که پیوستگی برقرار باشد.

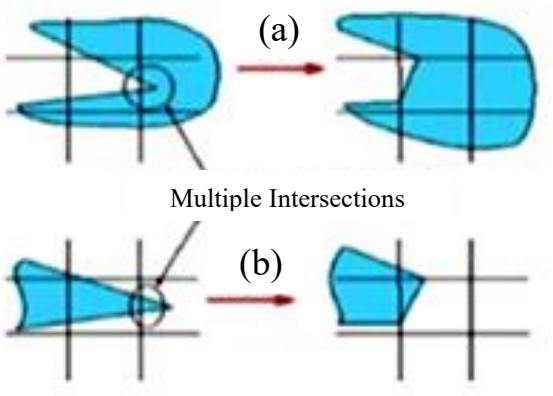


Fig. 3- Interpretation of multiple intersections: Original shape is shown on the left and the resulting shape on the right

شکل ۳-تفسیر تقاطع‌های متعدد: شکل اصلی در سمت چپ و شکل حاصل‌شده در سمت راست نمایش داده شده است

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

شرایط مرزی برای کلیه مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۴) به تفصیل نمایش داده شده است.

به‌منظور مدل سازی، سه هندسه مخزن مستطیلی به شرح جدول (۲) انتخاب گردید. که کلیه پارامترهای هندسه مخازن انتخاب شده شامل L طول مخزن، B عرض مخزن، b عرض کانال ورودی، H عمق مخزن، L/B نسبت ظاهری مخزن می‌باشد.

برای بررسی توزیع غلظت در سطح مخازن تعریف شده میزان غلظت ورودی برابر شش گرم در لیتر و دبی ورودی به مخزن برابر ۱۰ لیتر برثانیه در نظر گرفته شده است.مدت زمان انجام تحلیل انجام گرفته ۱۰ برابر زمان رسیدن غلظت ورودی به انتهای مخزن در نظر گرفته شده است. و نتایج در این زمان بررسی گردید.

واسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی توسعه یافته در این پژوهش، مقادیر میانگین سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از مطالعه‌های پیشین مقایسه شده‌اند (Kantoush, 2007). نتایج این مقایسه در شکل (۵) ارائه شده است. همچنین، برای تحلیل دقیق‌تر میزان همخوانی و پراکندگی داده‌ها، نمودار پراکندگی (Scatter Plot)بین مقادیر مشاهداتی (Observed) و پیش بینی (Predicted) متوسط سرعت جریان درون حوضچه (u) ، در شکل (۶) ترسیم شده اند و به‌عنوان معیاری برای ارزیابی دقت مدل عمل می‌کند. در این نمودار، خط نقطه‌چین با شیب واحد به‌عنوان خط بهترین تطبیق (Perfect Agreement Line) در نظر گرفته شده است؛ یعنی در صورت کاملاً دقیق بودن پیش‌بینی‌ها، تمام نقاط داده بر روی این خط قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که نقاط داده‌های مشاهده‌شده به طور قابل توجهی نزدیک به این خط قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده همبستگی قوی و همخوانی بالای مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی است. معادله خط رگرسیون برازش شده از بین داده ها ($y = 1.0091x$) نیز نشان‌دهنده انطباق بسیار نزدیک بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده است. برای کمّی‌سازی دقت مدل، شاخص‌های آماری خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE = 0.065) و میانگین مربعات خطا (MSE = 0.037) محاسبه شده‌اند. مقادیر کم این شاخص‌ها نشان‌دهنده انحراف ناچیز مدل از داده‌های واقعی و در نتیجه اعتبار بالای مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار جریان است. علاوه بر این، خطوط منقطع ترسیم شده با شیب‌های ±۲۰٪ در بالا و پایین خط بهرین تطبیق، به عنوان محدوده‌های قابل قبول دقت پیش‌بینی در نظر گرفته شده‌اند. قرار گرفتن بیشتر نقاط داده در داخل این محدوده‌ها، عملکرد مناسب مدل را در شرایط عملی و کاربردهای مهندسی تأیید می‌کند. به طور کلی، این تحلیل آماری و گرافیکی نقش حیاتی در اعتبارسنجی شبیه سازی صورت گرفته ایفا می‌کند و اطمینان لازم را فراهم می‌آورد که مدل توسعه‌یافته قادر است جزئیات و رفتارهای پیچیده پدیده‌های هیدرودینامیکی را با دقت قابل قبولی ارائه نماید.

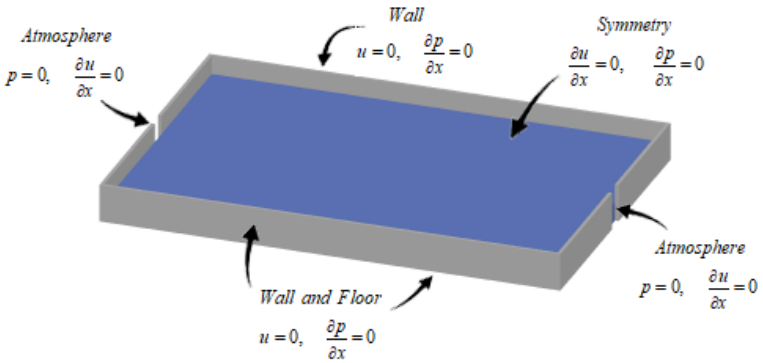


Fig 4 - Boundary conditions introduced to the model
شکل ٤- شرایط مرزی معرفی شده به مدل

Table 2- Specifications of the numerical models
جدول ۲- مشخصات سناریوهای مدل سازی

Model	B	L	L/B	b	H
m_1	4.00	4.00	1.00	0.25	0.30
m_2	4.00	8.00	2.00	0.25	0.30
m_3	4.00	16.00	4.00	0.25	0.30

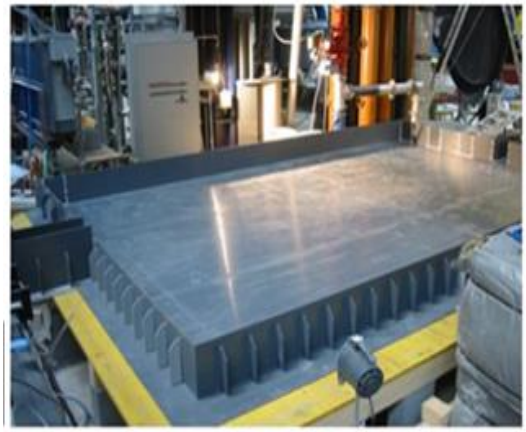


Fig. 5- The experimental setup used in the study by Kantoush (2007).
شکل ۵- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیقات (Kantoush, 2007)

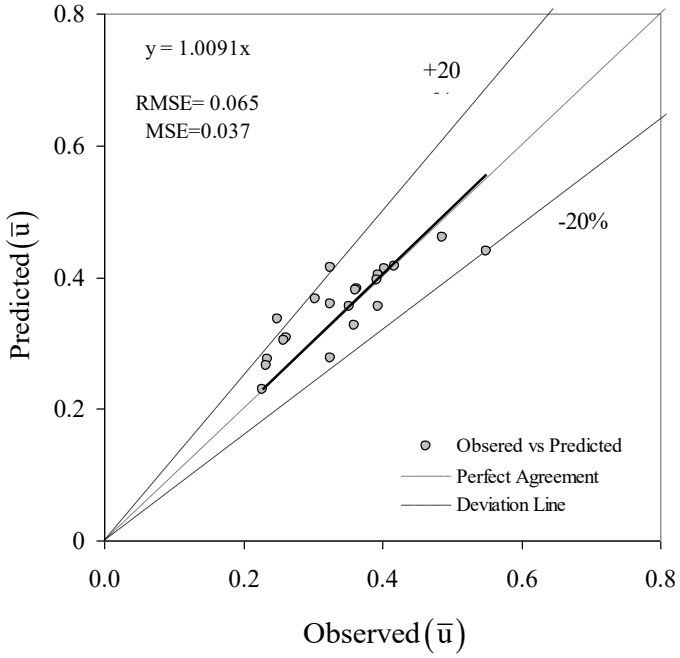


Fig. 6. Scatter plot of predicted versus observed spatially-averaged flow velocities within the settling basin
شکل ٦-نمودار پراکندگی سرعت های متوسط جریان پیش بینی شده در مقابل مقادیر مشاهداتی درون حوضچه رسوبگیر

یافته‌ها

تأثیر ضریب شکل حوضچه بر الگوی جریان و رسوب‌گذاری

در تحلیل رفتار جریان غلیظ درون حوضچه رسوب‌گیر با ضریب شکل معادل یک، تغییرات دینامیکی و پیشرفت جریان را می‌توان به وضوح در شکل (۷) مشاهده کرد. برای این منظور، از یک پارامتر نسبی زمان به نام "زمان پیشرفت" استفاده شده است که به صورت نسبت t/t_0 تعریف می‌شود. در این فرمول، t نمایان‌گر زمان لحظه‌ای پیشرفت پیشانی جریان غلیظ درون حوضچه و t_0 زمان مورد نیاز برای طی کردن کامل طول حوضچه توسط پیشانی جریان غلیظ است. در سناریوی اول و پس از گذشت سه ثانیه از آغاز اجرای مدل شکل (a–۷)، با توجه به اینکه پارامتر نسبی زمان پیشرفت t/t_0 به سمت ۰/۲۵ میل می‌کند، جریان غلیظ تنها موفق به طی کردن یک چهارم طول حوضچه می‌شود. با ادامه این روند و افزایش نسبت زمان پیشرفت به ۰/۵، پیشانی جریان غلیظ به‌طور تقریبی نیمی از طول حوضچه را طی می‌کند (شکل b–۷). پس از ۱۲ ثانیه از آغاز مدل شکل (c–۷)، پیشانی جریان غلیظ تمام تلاش خود را برای رسیدن به دیواره انتهایی حوضچه به کار می‌گیرد و در این مرحله،

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

پارامتر نسبی زمان پیشرفت به سمت یک میل می‌کند $t/t_0=1$، در حالی که پیشانی جریان غلیظ به دیواره نزدیک می‌شود، هنوز رسوبی از کانال انتهایی خارج نشده است. با توجه به مومنتوم (تصادم) به وجود آمده ناشی از برخورد پیشانی جریان غلیظ با دیواره انتهایی و انهدام مغزه پیشانی جریان غلیظ، گسترش جریان در ناحیه عرضی حوضچه آغاز می‌شود. این شرایط می‌تواند به تخلیه بخشی از رسوبات از کانال انتهایی منجر شود و احتمالاً در صورت افزایش غلظت در مجاورت دیواره انتهایی حوضچه، پتانسیل تغییر جهت حرکت نیز به وجود می‌آید. این مرحله به‌عنوان "فاز جریان برگشتی" یا "Reverse Flow Phase" نام‌گذاری می‌شود و زمانی محقق می‌گردد که پارامتر نسبی زمان از یک فراتر رود. بعد از گذشت ۱۶ ثانیه از اجرای مدل $t/t_0=1.34$ ، تخلیه رسوبات از کانال انتهایی آغاز می‌شود شکل (d–۷) و در زمان ۲۰ ثانیه $t/t_0=1.67$، تجمع رسوبات در مجاورت دیواره انتهایی شکل می‌گیرد شکل (e–۷) پس از ۳۰ ثانیه ،$t/t_0=2.5$ پیشانی جریان غلیظ پتانسیل لازم برای ایجاد جریان برگشتی را پیدا کرده و به سمت دیواره‌ها گسترش می‌یابد شکل (f–۷). این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیر ضریب شکل بر الگوی جریان و فرآیند رسوب‌گذاری است. با ادامه زمان، در ۴۰ ثانیه $t/t_0=3.34$ ، جریان برگشتی در حال تکامل است شکل (g–۷) و در زمان‌های ۷۰ ثانیه $t/t_0=5.84$ شکل (h–۷) و ۱۰۰ ثانیه $t/t_0=8.38$ شکل (i–۷) این جریان به‌طور کامل شکل می‌گیرد و حوضچه وارد فاز انباشت رسوبات می‌شود. در این شرایط، پیشانی جریان غلیظ ورودی به حوضچه با حداقل پخشیدگی در عرض، به سمت کانال خروج هدایت می‌شود.

در شـرایط با ضـریب شـکل حوضـچه برابر دو، الگوی پخش جریان غلیظ به شرح زیر است:

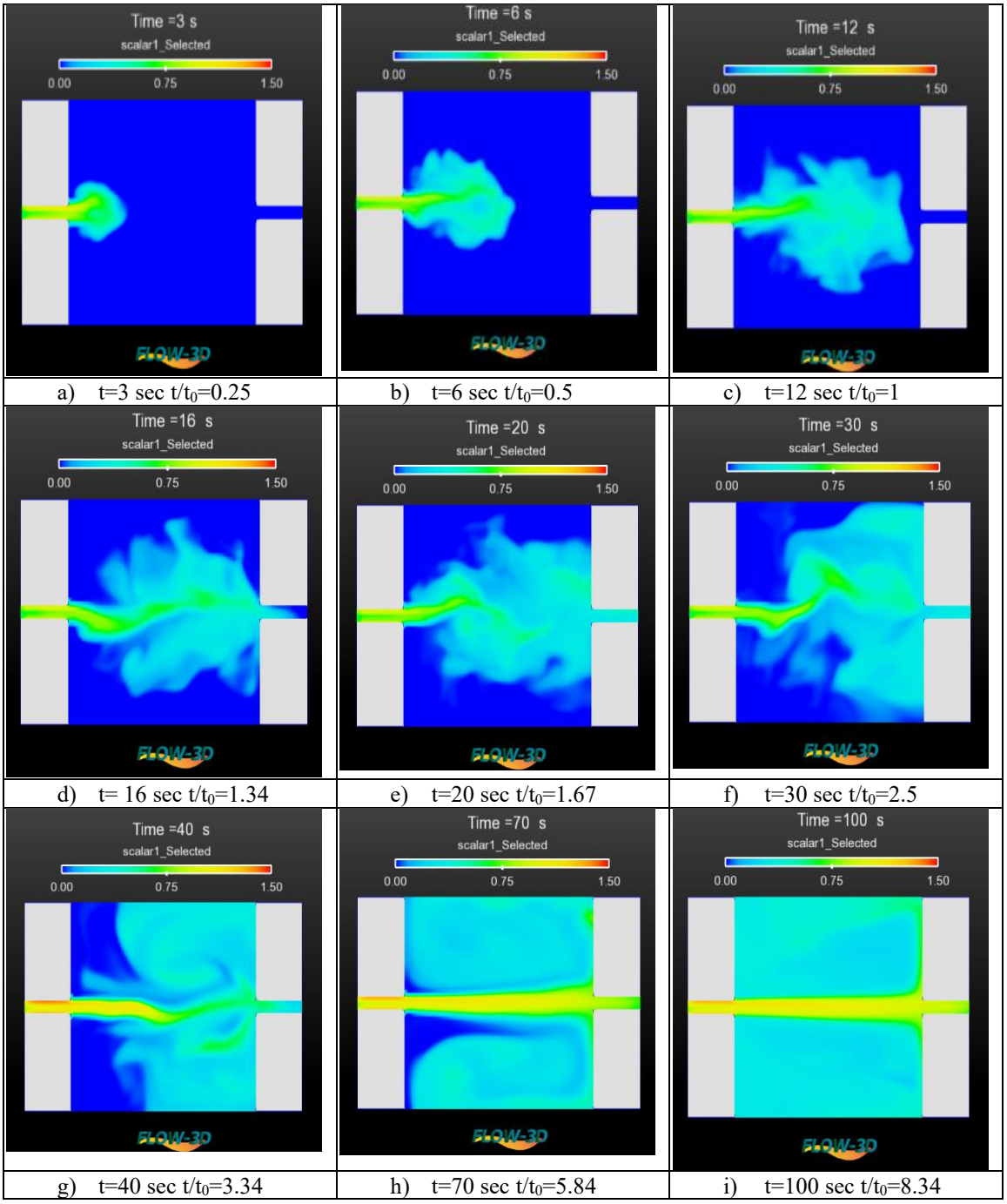
۱۲ ثانیه پس از اجرای مدل شکل (a–۸)، پیشانی جریان غلیظ بیش از یک سوم طول حوضچه را طی نموده است و با گذشت ۲۰ ثانیه (شکل b–۸)، پیشانی جریان غلیظ بیش از نیمی از طول حوضچه را پیموده است. شکل (c–۸) الگوی جریان را پس از گذشت ۵۰ ثانیه از اجرای مدل گزارش می‌نماید. در این حالت مشاهده می‌گردد که توزیع عرضی جریان به واسطه تشکیل گردابه‌های ون کارمن، شتاب بیشتری گرفته و توان جریان جهت طی مسیر طولی حوضچه بیشتر صرف توزیع عرضی و پخش رسوب در کل سطح حوضچه می‌گردد. در این زمان، پیشانی جریان غلیظ بیش از هفتاد درصد طول حوضچه را طی نموده است. همچنین گردابه‌های ون کارمن باعث شده‌اند که قبل از برخورد جریان غلیظ با دیواره مقابل، جریان وارد فاز برگشتی شود. پس از طی ۶۰ ثانیه از اجرای مدل تفاوت چندانی با حالت قبل در توزیع طولی پیشانی جریان غلیظ رخ نداده است شکل (d–۸)، اما گسترش گردابه‌های ون کارمن در خلاف جهت جریان قابل مشاهده است. در این شرایط، جریان برگشتی تقریباً کامل شده و گسترش عرضی آن تا دیواره ورودی حوضچه رسیده است. پس از طی ۷۰ ثانیه از اجرای مدل، جریان غلیظ وارد کانال تخلیه می‌شود (شکل e–۸). در این حالت، زمان پیشرفت به حدود $t/t_0=1.17$ می‌رسد، و گردابه‌های ون کارمن منجر به تکمیل فاز جریان برگشتی می‌شوند. با رسیدن زمان پیشرفت به مقدار $t/t_0=1.34$ جریان وارد فاز انباشت می‌گردد (شکل f–۸). شکل‌های (i, g, h–۸) به‌ترتیب مربوط به اجرای مدل در زمان‌های ۹۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ ثانیه هستند که همگی نشان‌دهنده تکمیل فاز انباشت در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل (۲) می‌باشند.

توزیع الگوی جریان حاوی رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل (۴) بشرح زیر می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل (a–۹) مشاهده می‌گردد پس از طی ۱۲ ثانیه از اجرای مدل، جریان آب و رسوب حدود ۱۵ درصد طول حوضچه را طی می‌ننماید. پس از گذشت ۵۰ ثانیه از اجرای مدل شکل (b–۹)، زمان پیشرفت به حدود $t/t_0=0.125$ می‌رسد. در این زمان، قبل از آنکه پیشانی جریان غلیظ یک‌سوم طول حوضچه را طی کند، مغزه جریان غلیظ تقریباً متلاشی شده و جریان چگال به دیواره‌های جانبی حوضچه رسیده است. این نشان می‌دهد، در حوضچه‌های با ضریب شکل بیشتر از دو، گسترش عرضی جریان زودتر از گسترش طولی آن رخ می‌دهد. با گذشت ۱۰۰ ثانیه از اجرای مدل شکل (c–۹)، توزیع عرضی و طولی رسوبات حدود ۳۵ درصد کل حوضچه را پوشش داده است.مادامی‌که زمان پیشرفت به $t/t_0=0.4$ نزدیک می‌شود، توزیع رسوبات تقریباً نیمی از کل حوضچه را فرا گرفته است.

این نشان می‌دهد که الگوی جریان قبل از اتمام فاز پیشرفت و تشکیل فاز جریان برگشتی، وارد فاز انباشت می‌شود. پس از ۴۰۰ ثانیه که زمان پیشرفت به یک می‌رسد شکل (e–۹)، یک جریان غلیظ ثانویه درون جریان چگال اولیه تشکیل شده است که از الگوی گردابه‌های ون کارمن تبعیت می‌کند.

پس از سپری شدن ۵۰۰ ثانیه از اجرای مدل و ۱۰۰ ثانیه از زمان تشکیل جریان غلیظ ثانویه، رسوبات از کانال تخلیه خارج می‌شوند و الگوی جریان بدون آنکه واردفاز برگشتی شود، وارد فاز انباشت می‌گردد (شکل f–۹). شکل‌های (h، g و h–۹) به‌ترتیب در زمان‌های ۵۵۰، ۱۳۰۰ و ۲۰۰۰ ثانیه نشان‌دهنده تکمیل فاز انباشت در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل (۴) می‌باشند. بررسی‌ها و مقایسه نتایج الگوی جریان آب و رسوب درحوضچه‌های با ضریب شکل (۱)، (۲) و (۴) حاکی از آن است که در حوضچه‌های با ضریب شکل بیشتر مانند شکل (۹)، گسترش عرضی جریان چگال نسبت به گسترش طولی آن سریع‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین امکان تشکیل جریان غلیظ ثانویه درون جریان چگال اولیه وجود دارد که از الگوی گردابه‌های ون کارمن نیز پیروی می‌کند.



a) t=3 sec t/t_0=0.25 b) t=6 sec t/t_0=0.5 c) t=12 sec t/t_0=1

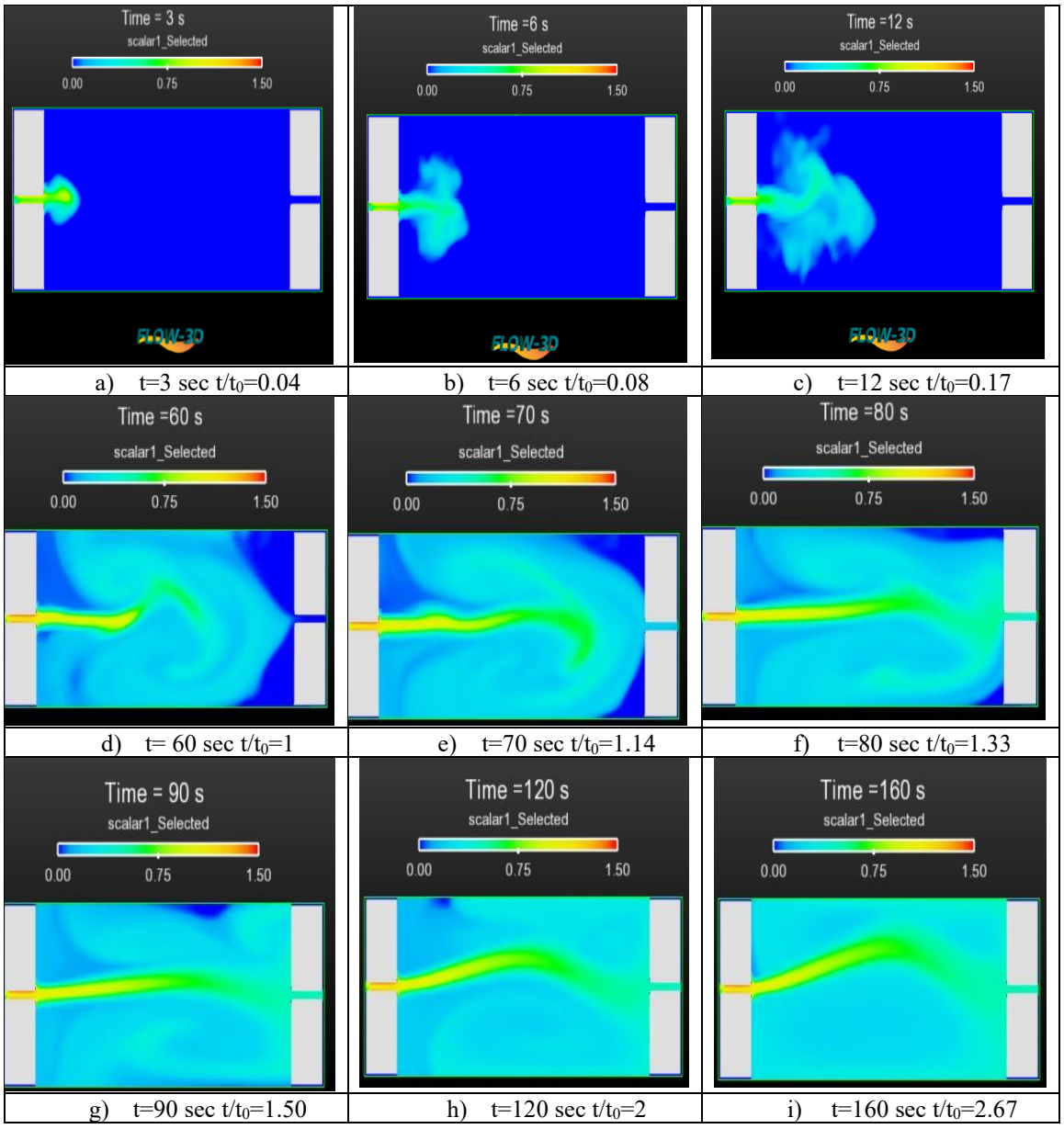
d) t= 16 sec t/t_0=1.34 e) t=20 sec t/t_0=1.67 f) t=30 sec t/t_0=2.5

g) t=40 sec t/t_0=3.34 h) t=70 sec t/t_0=5.84 i) t=100 sec t/t_0=8.34

Fig.7- Analysis of sedimentation pond performance variations: instantaneous progression phases of the front, return flow, and accumulation under a shape coefficient of (1)

شکل ۷- تحلیل تغییرات عملکرد حوضچه رسوب‌گیر: فازهای پیشرفت لحظه‌ای پیشانی، جریان برگشتی و انباشت در شرایط با ضریب شکل (۱)

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094



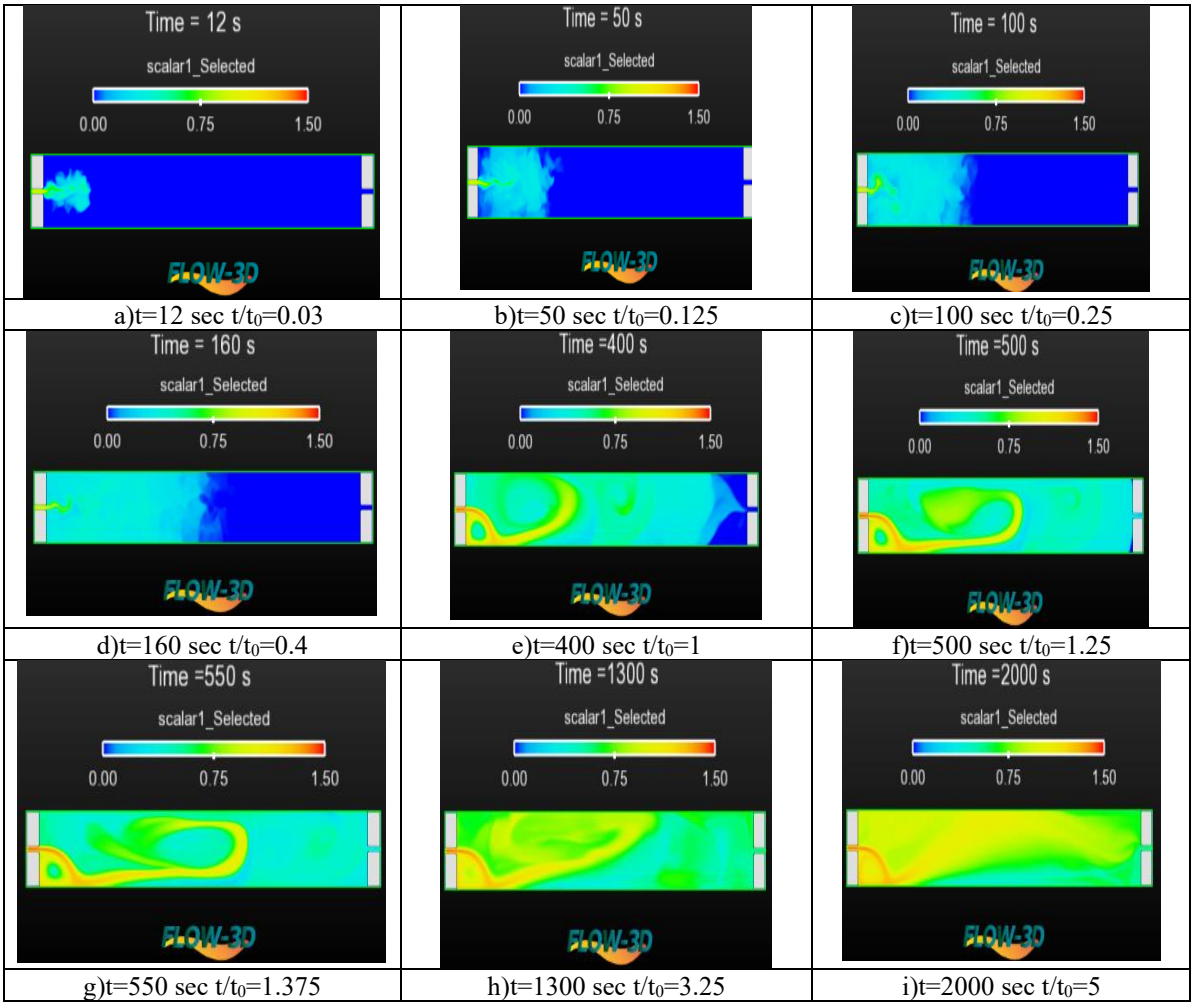
a) t=3 sec t/t_0=0.04 b) t=6 sec t/t_0=0.08 c) t=12 sec t/t_0=0.17

d) t= 60 sec t/t_0=1 e) t=70 sec t/t_0=1.14 f) t=80 sec t/t_0=1.33

g) t=90 sec t/t_0=1.50 h) t=120 sec t/t_0=2 i) t=160 sec t/t_0=2.67

Fig. 8- Analysis of sedimentation pond performance variations: instantaneous progression phases of the front, return flow, and accumulation under a shape coefficient of (2).

شکل ۸ - تحلیل تغییرات عملکرد حوضچه رسوب‌گیر: فازهای پیشرفت لحظه‌ای پیشانی، جریان برگشتی و انباشت در شرایط با ضریب شکل (۲)



a)t=12 sec t/t_0=0.03 | b)t=50 sec t/t_0=0.125 | c)t=100 sec t/t_0=0.25

d)t=160 sec t/t_0=0.4 | e)t=400 sec t/t_0=1 | f)t=500 sec t/t_0=1.25

g)t=550 sec t/t_0=1.375 | h)t=1300 sec t/t_0=3.25 | i)t=2000 sec t/t_0=5

Fig. 9- Analysis of sedimentation pond performance variations: instantaneous progression phases of the front, return flow, and accumulation under a shape coefficient of (4).

شکل ۹ - تحلیل تغییرات عملکرد حوضچه رسوب‌گیر: فازهای پیشرفت لحظه‌ای پیشانی، جریان برگشتی و انباشت در شرایط با ضریب شکل (٤)

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی تجربی الگوی جریان آب و رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضرایب شکل مختلف، می‌توان به نتایج علمی زیر دست یافت:

تحقیقات نشان داده که در حوضچه‌های با ضریب شکل بالاتر (مانند مخزن با ضریب شکل ۴)، گسترش عرضی جریان چگال نسبت به گسترش طولی آن سرعت بیشتری دارد. به‌طوری که پیشانی جریان غلیظ قبل از رسیدن به یک سوم طول حوضچه، به دیواره‌های جانبی می‌رسد و باعث توزیع یکنواخت رسوبات در سطح حوضچه می‌شود. این پدیده می‌تواند به‌دلیل افزایش سرعت انتشار جریان در جهت عرضی نسبت به جهت طولی در حوضچه‌های با ضریب شکل بالا باشد. همچنین در این شرایط، امکان تشکیل جریان غلیظ ثانویه درون جریان اولیه وجود دارد که از الگوی گردابه‌های ون کارمن پیروی می‌کند. تشکیل این جریان ثانویه می‌تواند ناشی از پدیده‌های پیچیده هیدرودینامیکی در حوضچه‌های با ضریب شکل بالا باشد. برعکس، در حوضچه‌های با ضریب شکل کمتر (مانند مخزن با ضریب شکل ۱ و ۲)، گسترش طولی جریان چگال نسبت به گسترش عرضی آن سرعت بیشتری دارد و احتمال تشکیل جریان برگشتی بیشتر است. این الگوی جریان می‌تواند ناشی از کاهش اثرات جبهه‌ای و افزایش اثرات طولی در حوضچه‌های با ضریب شکل پایین‌تر باشد. بنابراین، در طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر باید به ضریب شکل حوضچه به‌عنوان یک پارامتر مهم توجه شود تا الگوی جریان و توزیع رسوبات در آن‌ها بهینه گردد. این موضوع می‌تواند در بهبود عملکرد و راندمان این سازه‌ها نقش بسزایی داشته باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، بدینوسیله از همکاری ها و حمایت‌های دانشگاه صنعتی جندی شاپور در فرآیند تهیه و تدوین این پژوهش صمیمانه قدردانی و تشکر می نمایند.

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: محمد افراشته، تجزیه و تحلیل داده ها، تفسیر نتایج و نگارش پیشنویس مقاله.

نویسنده دوم: بابک لشکرآرا، استاد راهنما، تجزیه و تحلیل داده‌ها، اعتبارسنجی، بحث و ویرایش نهایی

References

1- Abasi Zade Bagheban, M. and Lashkar-Ara, B., 2020. Evaluation of the Performance of the Hydraulic Suction Method in Sediment Removal of Reservoirs. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 50(98), pp.43-52. DOI: 10.22034/CEEJ.2020.11126.

2- Aryaei, H. and Lashkar-Ara, B., 2023. Evaluation of bottom outlet effect on the behavior of entered turbidity current into the Dez Dam reservoir. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, *3*(3), pp.20-36. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9641.1061.

3- Asghari Pari, S.A., Kashefi Pour, S.M. and Ghomeshi, M., 2010. Experimental investigation on controlling of sedimentary density current using constructing obstacle. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 33(2), pp.1-15. https://doi.org/10.22055/jise.2010.13475

4- Brooks, R.H., 1965. *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University.

5- Dufresne, M., Dewals, B.J., Erpicum, S., Archambeau, P. and Pirotton, M., 2010. Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. International *Journal of Sediment Research*, 25(3), pp.258-270. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60043-1.

6- Goudarzi, M., Lashkar-Ara, B. and Seyed Kaboli, H., 2021. Experimental study of the consolidation of the cohesive sediments Case study: Karkheh dam reservoir. *Scientia Iranica*, *28*(6), pp.3072-3081. Doi: 10.24200/SCI.2021.57114.5069.

7- Goodland, R., 1989. The World Bank's new policy on the environmental aspects of dam and reservoir projects. Indian *Journal of Public Administration*, 35(3), pp.607-633. https://doi.org/10.1177/0019556119890328.

8- Kantoush, S., 2007. Symmetric or asymmetric flow patterns in shallow rectangular basins with sediment transport. In *Proceedings of the 32nd Congress of IAHR*. https://hdl.handle.net/20.500.11970/110019.

9- Kantoush, S.A. and Schleiss, A.J., 2009. Channel formation during flushing of large shallow reservoirs with different geometries. *Environmental Technology*, *30*(8), pp.855-863. https://doi.org/10.1080/09593330902990162.

10- Lai, J.S. and Shen, H.W., 1996. Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), pp.237-255. https://doi.org/10.1080/00221689609498499

11- Lashkar-Ara, B., Baharvand, S. and Najafi, L., 2020. The Study of the Performance of Data-Driven Models to Predict the Scour Depth Caused by the Aerated Vertical Jet. *Irrigation Sciences and Engineering*, *43*(4), pp.79-89. doi: 10.22055/jise.2021.36599.1959.

12- Lashkar-Ara, B. and Kiani, F., 2025. Evaluating optimal relationships for estimating suspended sediment discharge in the Balaroud River. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(4), pp. 81-92. DOI: 10.22055/jise.2025.48205.2139.

13- Lee, C., Schwab, D.J. and Hawley, N., 2005. Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C3). https://doi.org/10.1029/2004JC002326.

14- Liu, R., Zhou, J.L. and Wilding, A., 2004. Microwave-assisted extraction followed by gas chromatography–mass spectrometry for the determination of endocrine disrupting chemicals in river sediments. *Journal of Chromatography* A, 1038(1-2), pp.19-26. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.03.030

15- Liu, H.K., 1958. Closure to "mechanics of sediment-ripple formation". *Journal of the Hydraulics Division*, 84(5), pp.5-31. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000225.

16- Michalec, B., 2008. Appraisal of suspended sediment concentration on reference level according to van Rijn's method. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, (40). https://doi.org/10.2478/v10060-008-0038-x.

17- Morris, G.L. & Fan, J. (1998) Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use. New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-043302-1.

18- Morris, G.L. and Fan, J., 1998. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use.*

19- Rouse, H., 1937. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *102*(1), pp.463-505. https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004872.

20- Shadorvan, M., Lashkar-Ara, B. and Seyed Kaboli, H., 2018. Assessment of the cohesive sediments fall velocity in Karkheh Dam reservoir. *Irrigation Sciences and Engineering*, *41*(2), pp.211-224.pp.211-224. Doi: 10.22055/JISE.2018.22358.1601.

21- Van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering,* 110(12), pp. 1733-1754. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).