

Research Article**Numerical Evaluation of the Performance of Protective Steel Beams in Reducing Bridge Opening Blockage Risk Caused by Floating Woody Debris in Mountainous Forested Rivers****Mohammad Rostami^{1✉}, Amir Hossein Rahimi²****Corresponding Author:** Faculty Member, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization(✉ **Corresponding Author:** m_rostami@areeo.ac.ir)

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE
Received: 2 June 2026	Rostami, M., Rahimi, A.H., (2026). Numerical Evaluation of the Performance of Protective Steel Beams in Reducing Bridge Opening Blockage Risk Caused by Floating Woody Debris in Mountainous Forested Rivers. V.26, No.100, P: 65-90
Revised: 22 June 2026	https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.373001.1649
Accepted: 25 June 2026	
Available Online: 12 July 2026	

Extended Abstract**Introduction**

Rivers in mountainous forested regions transport not only water and sediment during flood events, but also large amounts of woody debris, including tree trunks, branches, and vegetation residues. These debris materials accumulate around hydraulic crossing structures such as bridges, reducing flow conveyance capacity, increasing water levels, intensifying local scour, and consequently increasing the risk of flooding. In recent years, steel guiding beams installed upstream of bridges have been considered as an effective countermeasure to modify the movement path of woody debris and reduce bridge blockage probability. These beams alter the orientation of floating logs and facilitate their passage through bridge openings. Despite the promising results of laboratory investigations, uncertainties still remain regarding the optimal arrangement of guiding beams and their performance under different hydraulic conditions. Furthermore, the high cost and limitations of experimental studies have highlighted the necessity of numerical modeling approaches. Therefore, in this study, the performance of steel guiding beams in reducing bridge blockage probability was investigated using the FLOW-3D software and Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques. The effects of beam arrangement and flow discharge on the movement and passage behavior of woody debris under flood conditions were evaluated.

Methodology

In this study, numerical simulations of woody debris behavior and the performance of steel guiding beams were carried out using FLOW-3D software. Model calibration, validation, and scenario analyses were performed based on the laboratory experiments of Harada *et al.*, (2018). First, the geometry of the channel, bridge, and steel beam arrangements were reconstructed according to the experimental setup. The model consisted of an open channel with a specified slope, bridge piers, and different arrangements of steel guiding beams installed upstream of the bridge.

Three scenarios were simulated: (1) bridge condition without guiding beams, (2) bridge condition with the beam arrangement proposed by Harada *et al.*, (2018) (Type B), and (3) bridge condition with the new arrangement proposed in the present study (Type C). In addition, the effects of woody debris introduction mode (individual and simultaneous entry) and the number of logs on bridge blockage probability were investigated.

Woody debris pieces were modeled as floating rigid bodies with identical geometric and physical properties, including length, diameter, and density. The logs entered the flow from upstream, and their

movement, rotation, collision with steel beams, passage through bridge openings, and accumulation around bridge piers were analyzed. The interaction *between* flow, woody debris, and steel beams was simulated using the moving rigid body capability of FLOW-3D.

In each simulation, parameters such as the number and percentage of logs passing through the bridge openings were extracted and compared with laboratory data. While the reference experiments were conducted within a discharge range of 1 to 2.3 L/s, the discharge range in this study was extended to 0.5–3.5 L/s. Finally, the numerical simulation results were compared with experimental observations and previous studies to evaluate the accuracy and capability of FLOW-3D in simulating woody debris behavior and assessing the performance of steel guiding beams.

Results and Discussion

The numerical simulation results showed that the use of steel guiding beams upstream of the bridge effectively modified the movement path of woody debris and reduced bridge blockage probability. In the absence of guiding beams, debris accumulation upstream of the bridge caused opening blockage, flow backwater effects, and reduced flood conveyance capacity. In contrast, the guiding beams changed the orientation of the logs and facilitated their passage through the bridge openings.

For the simultaneous entry of 50 logs, the passage percentage without guiding beams ranged from 0 to 60%, whereas it increased to 20–75% in the presence of Type B guiding beams. In the case of individual log entry, the passage efficiency increased by an average of 35% with Type B beams. To improve system performance, a new beam arrangement (Type C) was proposed and evaluated. Under a discharge of 2.3 L/s and simultaneous entry of 20 logs, the passage percentage was 78% for Type B and 94% for Type C. Furthermore, when the number of logs increased from 1 to 20, the average passage percentages for the no-beam, Type B, and Type C conditions were 51%, 87%, and 95%, respectively. The results demonstrated that the proposed Type C arrangement can effectively reduce bridge blockage risk and improve flood conveyance safety in mountainous forested rivers.

Conclusion

The numerical simulation results demonstrated that the accumulation of woody debris at bridge openings can significantly reduce bridge conveyance capacity and increase the risk of flooding and associated damages in forested mountainous rivers. In the absence of guide piles, a considerable portion of the logs accumulated upstream of the bridge, causing blockage of the bridge opening, flow backwater effects, and a reduction in flood conveyance efficiency. This phenomenon became more pronounced under conditions of higher flow discharge and the simultaneous introduction of a large number of woody debris elements. The results further indicated that the installation of steel guide piles upstream of the bridge effectively improved the movement path of woody debris, reduced direct impacts on bridge piers, and increased the probability of debris passing through the bridge opening. Comparison of different pile configurations revealed that the Type B arrangement proposed by Harada *et al.*, (2018) performed better than the condition without guide piles; however, approximately 13% of the woody debris still accumulated around the bridge piers. In contrast, the Type C arrangement proposed in the present study provided more efficient debris guidance by improving the approach angle of the debris toward the bridge opening. As a result, only about 5% of the woody debris failed to pass through the bridge opening, while the average passage efficiency reached approximately 95%. The analysis also showed that increasing the number of woody debris elements entering the flow substantially increased the likelihood of bridge blockage under conditions without guide piles. However, the use of steel guide piles, particularly the Type C configuration, maintained a high debris passage efficiency even under conditions of high debris concentration. Furthermore, the validation results confirmed that FLOW-3D is capable of accurately simulating the hydrodynamic behavior of woody debris, its interaction with flow, and the performance of debris-guiding structures. Therefore, the model can serve as an effective tool for the design, assessment, and optimization of mitigation measures aimed at reducing bridge blockage hazards in mountainous river systems.

Keywords: Flood hazard, Bridge hydraulic capacity, Woody debris, guide beam, FLOW-3D model

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors have read and approved the final manuscript.

Funding

The corresponding author conducted this study as an extension of the research project entitled “Experimental Investigation of the Effects of Hydraulic Crossing Structure Geometry on the Trapping of Large Woody Debris and the Aggravation of Flood Hazards,” carried out at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. The present research was undertaken to develop practical measures for reducing flood risks associated with woody debris accumulation at bridges. No financial support was received from any public, commercial, or non-profit organization for conducting, writing, or publishing this study.

Data Availability Statements

All relevant data and results supporting the findings of this study are presented within the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contribution

All authors contributed to the conception and design of the study, the conduct of the research, and the preparation of the manuscript. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript..

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere appreciation to all individuals who contributed to this research, particularly the management of the River Engineering and Coastal Engineering Department at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, for their valuable support and cooperation throughout the study.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.373001.1649>

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی شناور در رودخانه‌های کوهستانی جنگلی

محمد رستمی^۱، امیرحسین رحیمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

چکیده

تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه پل‌ها یکی از عوامل اصلی کاهش ظرفیت عبور سیلاب و افزایش خطر آب‌گرفتگی در رودخانه‌های کوهستانی جنگلی است. در این پژوهش، عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در کاهش احتمال گرفتگی دهانه پل‌ها با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی گردید. تأثیر آرایش تیرک‌ها و شرایط جریان بر نحوه حرکت و عبور واریزه‌های چوبی در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در شرایط بدون استفاده از تیرک‌های هدایت‌کننده، به‌طور متوسط حدود ۴۹ درصد از الوارها در بالادست پل تجمع می‌کنند و موجب کاهش ظرفیت عبور جریان می‌شوند. در آرایش پیشنهادی مطالعه پیشین، میزان تجمع واریزه‌ها به حدود ۲۳ درصد کاهش یافت، در حالی که آرایش پیشنهادی این پژوهش با هدایت موفق بیش از ۹۴ درصد واریزه‌ها از دهانه پل و کاهش تجمع به کمتر از ۵ درصد، بالاترین کارایی را در جلوگیری از انسداد دهانه‌ها نشان داد. اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که میانگین خطای نسبی پیش‌بینی‌ها حدود ۱۸ درصد است که بیانگر دقت قابل قبول مدل در بازتولید فرآیند انتقال و تجمع واریزه‌های چوبی است. بر این اساس، استفاده از تیرک‌های هدایت‌کننده با آرایش پیشنهادی می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش خطر گرفتگی پل‌ها و افزایش ایمنی عبور سیلاب در رودخانه‌های جنگلی باشد.

واژه‌های کلیدی: خطر سیلاب، آبگذری پل، واریزه‌های چوبی، تیرک هدایت‌کننده، مدل FLOW-3D

مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های حدی اقلیمی است که بر اساس شواهد تاریخی و دیرینه اقلیمی همیشگی محیط فیزیکی و اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده باعث ضعیف شدن درختان و افزایش آسیب‌پذیری آنها در برابر وقوع بارش‌ها با شدت زیاد و سیلاب‌ها و همچنین افزایش احتمال ورود آنها به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها می‌شود. ورود تنه درختان به رودخانه‌ها و انتقال آنها به پایین‌دست، باعث تجمع در سازه‌های تقاطعی همچون پل‌ها و انسداد دهانه‌های آنها می‌شود (شکل ۱). این امر باعث کاهش ظرفیت عبور سیلاب می‌شود و شرایط را برای طغیان سیلاب به اراضی حاشیه رودخانه و ایراد خسارت به مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی فراهم می‌کند. جلوگیری از ورود تنه درختان به رودخانه‌ها نیازمند آبخیزداری در حوضه آبخیز است، اما در شرایط ورود آنها به رودخانه‌ها، نیازمند

^۱ عضو هیات علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (نویسنده مسئول: Email: m_rostami@areeo.ac.ir)

^۲ دانش‌آموخته سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

شناخت مکانیزم انتقال و عملکرد آنها در مواجهه با سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی و در نهایت ارائه راهکارهایی برای جلوگیری از تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه سازه‌هاست. برای بررسی چگونگی تقابل واریزه‌های چوبی با سازه پل‌ها، احتمال گرفتگی دهانه‌ها، تأثیر این پدیده بر طغیان سیلاب و مدیریت بحران در شرایط مواجهه با این واریزه‌ها مطالعات متعددی شده است. فلوسبائو (Flussbau, 2009) با بررسی حوضه آبریز رودخانه زیل^۱ واقع در زوریخ سوئیس که مستعد انتقال الوارها و ایجاد انسداد در پایه‌های پل است، نتیجه‌گیری کرد که در سیل‌های با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله به مقدار ۶۰۰۰ متر مکعب و در سیل‌های با دوره بازگشت ۳۰۰ ساله به مقدار ۱۲۰۰۰ متر مکعب الوار وجود خواهد داشت. این الوارها به دلیل آسیب شدیدی که به پایین‌دست می‌زنند نیاز به محافظت بسیار زیادی خواهند داشت. با این توضیح، وجود سازه‌های نگهدارنده الوار، مولفه ضروری در مدیریت سیل است.



شکل ۱- انسداد دهانه پل توسط واریزه‌های چوبی

Fig. 1- Blockage of a bridge opening by woody debris

سندلهوفر (Sendlhofer, 2010) یک پل واقع در شهر تیرول در اتریش را مورد توجه قرار داد و خطرهای ناشی از گرفتگی پل را در این منطقه بررسی کرد. این محقق فرآیندهای انسداد ناشی از چوب‌های شناور بزرگ را با استفاده از یک مدل فیزیکی از یک پل واقع بر رودخانه اوتس‌تالر^۲ در اتریش بررسی کرد. در این مطالعه، احتمال گیر افتادن چوب‌ها در سازه پل و همچنین اثر پس‌زدگی جریان تحت شرایط سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ تا ۱۰۰ سال محاسبه و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که وجود پایه‌های میانی پل به طور قابل توجهی احتمال انسداد توسط چوب‌های شناور و در نتیجه افزایش تراز آب در بالادست پل را افزایش می‌دهد.

شموکر و هاگر (Schmocker & Hager, 2011) با ارائه چارچوبی جامع برای تحلیل خطر چوب‌های شناور در رودخانه‌ها، فرآیند تولید، انتقال، تجمع و مدیریت چوب‌های شناور را در جریان‌های سیلابی بررسی کردند و نشان دادند تجمع چوب‌های شناور در محل پل‌ها، آبگذرها و دیگر سازه‌های عرضی می‌تواند موجب کاهش ظرفیت عبور جریان، افزایش تراز آب بالادست، تشدید آب‌شستگی موضعی و سرانجام افزایش خطر سیلاب‌گرفتگی شود. این پژوهش همچنین برای برآورد حجم بالقوه چوب‌های شناور در حوضه آبریز، ارزیابی احتمال انسداد سازه‌ها و انتخاب محل مناسب برای احداث سازه‌های نگهدارنده چوب روش‌هایی ارائه داده است. از مهم‌ترین دستاوردهای این مطالعه، معرفی سامانه‌های نوین کنترل و انحراف چوب‌های شناور در

² Ötztaler Ache

¹ Sihl

رودخانه‌های کوهستانی است که امکان کاهش خطرهای هیدرولیکی ناشی از تجمع چوب را فراهم می‌کند.

گسنتزر و همکاران (Gschnitzer et al., 2015)، در آزمایشگاه دانشگاه اینسبروک^۱ مدلی مقیاس‌شده از یک رودخانه را تهیه و با استفاده از الوارهای با شاخه و بدون شاخه و مخاطرات ناشی از آن به بررسی انسداد پل موجود در آن پرداختند. پارامترهای بحرانی پل، هندسه کانال آزمایشگاهی، شیب کانال، سطح آب و پارامترهای مربوط به الوارها از ویژگی‌های مورد بررسی در مطالعه یادشده است. نتایج تحقیق نشان داد که احتمال انسداد پل‌ها و مخاطرات ناشی از آن با افزایش طول و با وجود شاخه‌ها زیاد می‌شود. به‌علاوه، تاثیر شیب کانال و سطح آب بر احتمال گرفتگی و مخاطرات آن نیز بررسی گردید.

منصوری و احدیان (Mansouri and Ahadian, 2016) با اجرای آزمایش، پدیده گرفتگی سرریزهای کلید پیاپویی را در شرایط وجود واریزه بررسی کردند و نشان دادند ویژگی‌های هندسی سازه و مشخصات واریزه‌ها تأثیر قابل توجهی بر میزان انسداد و کاهش ظرفیت عبور جریان دارند. همچنین مشخص شد که تجمع واریزه‌ها در نواحی ورودی سرریز می‌تواند عملکرد هیدرولیکی سازه را به طور محسوسی کاهش دهد؛ موضوعی که ضرورت بررسی راهکارهای کنترل و هدایت واریزه‌ها را در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد.

موجتان و همکاران (Mojtan et al., 2022) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی، اثر برخورد واریزه‌های چوبی بزرگ شناور را با یک پل قوسی ساخته شده با مصالح بنایی بررسی کردند و نشان دادند اثر برخورد واریزه‌های شناور بر سازه پل می‌تواند به مراتب بزرگ‌تر از بارهای معمول هیدرولیکی باشد و بنابراین لازم است در طراحی، ارزیابی ایمنی و مدیریت ریسک پل‌ها در شرایط سیلابی، به نیروهای ناشی از برخورد و تجمع واریزه‌ها به‌طور ویژه توجه شود.

پوپما و همکاران (Poppema et al., 2022) با بررسی گرفتگی پل‌ها در سیلاب‌های مخرب اروپا در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که حدود نیمی از حجم تجمعات را آوارهای انسان‌ساخت تشکیل می‌دهد و پل‌های با فاصله کم بین پایه‌ها بیشترین خطر انسداد را دارند. نتایج این پژوهش بر اهمیت در نظر گرفتن آوارهای مختلط و ویژگی‌های هندسی پل در ارزیابی خطر گرفتگی و مدیریت سیلاب تأکید دارد. برای جلوگیری از این مخاطرات باید چاره اندیشید که واریزه‌های چوبی پیش از رسیدن به پل‌ها یا سازه‌های تقاطعی، توسط سازه‌های مکمل دیگری جمع‌آوری شوند یا با کمترین احتمال گرفتگی از داخل دهانه پل‌ها عبور کنند (شکل ۲).

در زمینه جمع‌آوری الوارها توسط سازه‌های مکمل، تحقیقاتی به اجرا در آمده است. بزو (Bezzola, 2006) در یک مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیر سازه‌های تله‌انداز و جمع‌آوری کننده الوارها پرداخت و گزارش داد طول الوارها باید حداقل به میزان ۱/۵ برابر فاصله بین دندانه‌ها باشد تا راندمان تله اندازی افزایش یابد. برابر تحقیقات فلوئید (Flussbau, 2005)، طول حدود دو سوم الوارهای منتقل شده به داخل رودخانه‌ها بیش از ۵ متر است که در این شرایط باید فاصله بین دندانه‌های سازه جمع‌کننده الوارها معادل ۳/۳ متر انتخاب شود. این محقق نشان داد ارتفاع دندانه‌ها تأثیر مستقیم بر حداکثر ارتفاع برگشت آب دارد. برای استفاده از تیرهای فولادی به عنوان تدابیر مقابله‌ای برای مسدود کردن واریزه‌های چوبی در سدهای صلب سابو^۲ (نوعی سازه کنترل رسوب و مهار جریان‌های واریزه‌ای) ارائه شده است. برای طراحی مؤثر چنین تدابیر مقابله‌ای، داشتن شناخت کافی از مکانیزم به دام افتادن واریزه‌های چوبی توسط این تدابیر ضروری است. در مطالعات هارادا و همکاران (Harada et al., 2017)، ساختاری متشکل از تیرهای فولادی برای استفاده در سدهای سابو ارائه می‌شود. این پیشنهاد در نتیجه اجرای آزمایش‌هایی که چرخش واریزه‌ها

² SABO Dams

¹Innsbruck

محققان مشاهده کردند الوارها ابتدا با تیرک‌های فولادی برخورد می‌کنند و با چرخش و تغییر زاویه حرکت، به راحتی از بین پایه‌های پل عبور می‌کنند. این محققان جانمایی مناسبی از تیرک‌های فولادی را در بالادست پل‌ها برای افزایش راندمان عبور واریزه‌ها و کاهش احتمال گرفتگی دهانه ارائه دادند. اما همچنان ابهام‌هایی در خصوص جانمایی تیرک‌ها یا تأثیر دیگر پارامترها وجود دارد و لازم است تحقیقات در این زمینه ادامه یابد. از آنجاکه مطالعات آزمایشگاهی هزینه بر و زمان‌بر است بنابراین می‌توان از مدل‌های ریاضی برای توسعه تحقیقات در این زمینه استفاده کرد.

در داخل مخزن سدهای سابو و مکانیزم به دام افتادن آنها توسط تیرک‌های فولادی را در نظر می‌گیرد، پیگیری شد. در زمینه اصلاح رفتار و جهت حرکت الوارها پیش از رسیدن به پل‌ها برای کاهش انسداد دهانه‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های جمع‌آوری الوارها نیز محققان ژاپنی مطالعات محدود و جدیدی کرده‌اند. هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) در یک کانال آزمایشگاهی، اثر وجود لوله‌های فولادی را در اصلاح رفتار واریزه‌های چوبی و جهت حرکت آنها به سمت پل‌ها بررسی کردند. در مطالعات این محققان، موقعیت پایه‌های فولادی در بالادست و تیپ جانمایی آنها تأثیر پارامترهای چون جهت حرکت واریزه‌های چوبی، قطر واریزه‌ها و اثر دبی جریان بررسی شده است. این



شکل ۲- استفاده از تیرک‌های فولادی هدایت کننده واریزه چوبی پیش از پل‌ها در ژاپن

Fig 2- Use of steel guide beams for directing woody debris upstream of bridges in Japan

الوارها و در نتیجه خطر انسداد پل افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت عبور جریان و افزایش خطر سیلاب گرفتگی در بالادست سازه شود. یافته‌های این تحقیق بر ضرورت لحاظ کردن انتقال مواد شناور، به‌ویژه الوارهای چوبی، در طراحی هیدرولیکی پل‌ها و دیگر سازه‌های تقاطعی رودخانه‌ها تأکید دارد.

در ادامه این تحقیقات و با هدف شناخت دقیق‌تر مکانیزم انتقال و تجمع الوارهای شناور در شرایط سیلابی، رستمی و گودرزی (Rostami, & Goodarzi, 2019) با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به شبیه‌سازی عددی این پدیده

از مطالعات محدود در کشور که به‌طور اختصاصی به بررسی پدیده انسداد دهانه پل‌ها توسط الوارهای شناور پرداخته است، پژوهش رستمی و همکاران (Rostami et al., 2018) است. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل فیزیکی و اجرای آزمایش‌های کنترل‌شده، تأثیر ویژگی‌های هندسی پل را بر احتمال گیر افتادن الوارهای چوبی در دهانه پل ارزیابی می‌کند. نتایج تحقیق نشان داده است که وجود پایه‌های میانی و کاهش عرض مؤثر دهانه پل نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش احتمال انسداد و تشکیل تجمعات چوبی دارد. با افزایش نسبت طول الوار به عرض دهانه، احتمال گیر افتادن

هدایت مناسب آنها احتمال تجمع و انسداد را در پایه‌ها و دهانه پل کاهش دهند (Harada *et al.*, 2018). با این حال، همچنان ابهام‌هایی در خصوص عملکرد این تدابیر تحت شرایط مختلف هیدرولیکی، جانمایی بهینه تیرک‌ها و اثر پارامترهای مختلف جریان وجود دارد. از سوی دیگر، مطالعات آزمایشگاهی گسترده به دلیل هزینه و زمان زیاد، همواره با محدودیت همراه است. در این شرایط، مدل‌های عددی سه‌بعدی می‌توانند ابزاری مناسب برای تحلیل رفتار واریزه‌های چوبی و ارزیابی عملکرد سازه‌های حفاظتی باشند. بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D به بررسی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده و حفاظتی در کاهش خطر گرفتگی دهانه پل‌ها می‌پردازد و تلاش می‌کند ضمن استفاده از قابلیت مدل عددی، زمینه توسعه مطالعات آینده را فراهم آورد و راهکارهای مؤثرتر برای مدیریت خطرهای ناشی از واریزه‌های چوبی در رودخانه‌ها ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، رفتار واریزه‌های چوبی و عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی عددی شد. برای ارزیابی دقت مدل عددی، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی و همچنین تحلیل سناریوها از نتایج مشاهدات آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018) استفاده شد. ابتدا هندسه کانال، پل و آرایش تیرک‌های فولادی بر اساس شرایط آزمایشگاهی در محیط نرم‌افزار اتوکد ساخته شد. مدل شامل یک کانال با شیب مشخص، پایه‌های پل و مجموعه‌ای از تیرک‌های فولادی است که در بالادست پل و با آرایش‌های مختلف قرار گرفتند. به کارگیری تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در بالادست پل تحت سه سناریو: (۱) حالت بدون تیرک‌های هدایت‌کننده در بالادست پل، (۲) حالت دارای تیرک‌های هدایت‌کننده بر اساس آرایش پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018) و (۳) حالت دارای آرایش پیشنهادی محققان این مطالعه شبیه‌سازی گردید. علاوه بر این، تأثیر

پرداختند. در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی الوارهای شناور با شکل‌های هندسی مختلف در هنگام نزدیک شدن به پل و فرآیند گیر افتادن آنها در شرایط بود یا نبود پایه‌های میانی بررسی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که نرم‌افزار FLOW-3D می‌تواند با دقتی مناسب حرکت و اندرکنش اجسام شناور با جریان آب و سازه‌های هیدرولیکی را شبیه‌سازی کند و تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی ارائه دهد. همچنین مشخص شد که حضور پایه‌های پل و ویژگی‌های هندسی الوارها تأثیر قابل توجهی بر مسیر حرکت، نحوه چرخش و احتمال انسداد آنها دارد. بر اساس نتایج این مطالعه، پیشنهاد گردید که راهکارهای نوآورانه و سازه‌های کمکی به منظور هدایت، انحراف یا جلوگیری از تجمع الوارها در دهانه پل‌ها بررسی و توسعه داده شوند تا خطر انسداد و پیامدهای ناشی از آن در هنگام وقوع سیلاب کاهش یابد.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که انتقال و تجمع واریزه‌های چوبی در رودخانه‌ها، یکی از عوامل مهم در کاهش ظرفیت عبور سیلاب و افزایش خطر انسداد دهانه پل‌ها در زمان وقوع سیلاب‌های شدید است. تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های متوالی، ضعف پوشش گیاهی و وقوع سیلاب‌های پرانرژی، احتمال ورود تنه درختان و بقایای چوبی را به رودخانه‌ها افزایش می‌دهد و در نتیجه، مخاطرات ناشی از گرفتگی سازه‌های تقاطعی را تشدید می‌کند. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در کشورهای مختلف نشان داده‌اند که مشخصات هندسی الوارها، شرایط هیدرولیکی جریان، هندسه پل و نحوه جانمایی سازه‌های حفاظتی، تأثیر مستقیمی بر احتمال انسداد و میزان خطرپذیری سازه‌ها دارند.

در سال‌های اخیر استفاده از تیرک‌ها و پایه‌های فولادی محافظ به عنوان راهکاری برای کنترل مسیر حرکت واریزه‌های چوبی و کاهش احتمال گرفتگی دهانه پل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که این سازه‌ها می‌توانند با تغییر زاویه حرکت الوارها و

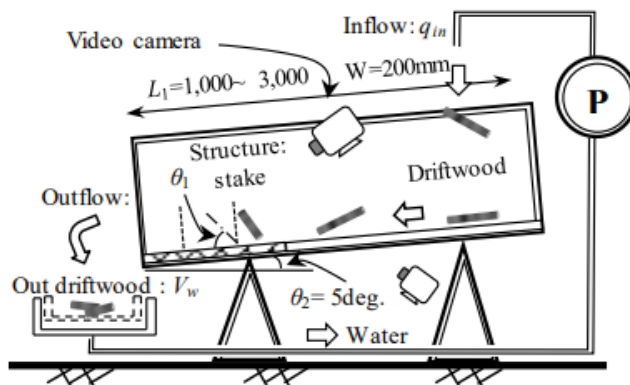
نحوه ورود واریزه‌های چوبی به جریان، شامل ورود منفرد (تک‌تک) و ورود همزمان چند الوار، و همچنین اثر تعداد الوارها بر احتمال گرفتگی دهانه‌های پل بررسی و تحلیل شد.

معرفی مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) در آزمایشگاه کیوتو ساخته‌اند. این مدل شامل یک کانال مستطیلی با ابعاد ۲۰ سانتی متر ارتفاع، ۲۰ سانتی متر عرض و ۳۰۰ سانتی متر طول و زاویه شیب ۵ درجه است. از این کانال برای ارزیابی گرفتگی دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی و بررسی تاثیر به کارگیری تیرک‌های فولادی در بالادست پل در تغییر جهت و هدایت واریزه‌های چوبی از دهانه‌ها استفاده شده است. سازه پل توسط سه پایه پلی کربناتی به قطر ۱ سانتی-متر به فاصله ۵ سانتی-متر از یکدیگر در بخش انتهایی کانال نصب شده است. تیرک‌های فولادی نیز هم قطر پایه‌های پل هستند و در آزمایش‌هایی که نیاز به استفاده از آنها بوده با جانمایی تعریف شده‌ای به فاصله ۱۵ سانتی-متری از پایه‌های پل قرار دارند. در این مطالعه، از واریزه‌های چوبی به قطر ۳ میلی-متر و طول ۱۰ سانتی-متر استفاده شده است. دبی جریان (q_{in}) و واریزه‌های چوبی از بالادست وارد کانال آزمایشگاهی می‌شوند. شکل (۳) نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

واریزه‌های چوبی به صورت اجسام صلب شناور با مشخصات هندسی و فیزیکی یکسان شامل طول، قطر و چگالی ثابت در مدل تعریف شدند. این الوارها از بالادست وارد جریان می‌شوند و نحوه حرکت، چرخش، برخورد با تیرک‌های فولادی، عبور از دهانه‌های پل یا تجمع در اطراف پایه‌ها ارزیابی شد. اندرکنش میان جریان، الوارها و تیرک‌های فولادی با استفاده از قابلیت شبیه‌سازی اجسام صلب متحرک در نرم‌افزار FLOW-3D مدل‌سازی شد.

در هر شبیه‌سازی، پارامترهایی مانند تعداد و درصد الوارهای عبوری از دهانه‌های پل استخراج و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. آزمایش‌های مرجع در دامنه دبی ۱ تا ۲/۳ لیتر بر ثانیه اجرا شده‌اند و در این مطالعه، دامنه دبی گسترش یافت و محدوده دبی بین ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده گردید. سرانجام، نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی و یافته‌های مطالعات پیشین مقایسه شد تا قابلیت و دقت نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی رفتار واریزه‌های چوبی و ارزیابی عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در کاهش احتمال گرفتگی دهانه پل‌ها بررسی شود. در ادامه، به مشخصات

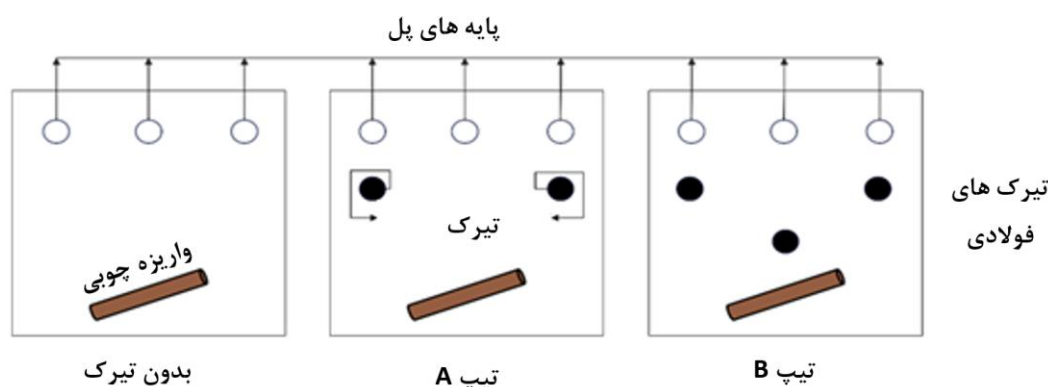


شکل ۳- نمودار شماتیک مدل آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada et al., 2018)

Fig. 3- Schematic diagram of the experimental model used by Harada et al., (2018)

در تحقیق گفته شده، تغییر جانمایی تیرک‌ها در بالادست پل، تغییر دبی جریان ورودی به کانال و نحوه ورود واریزه‌های چوبی به داخل کانال آزمایش شدند. مطابق شکل (۴)، آزمایش‌ها در دو حالت بدون تیرک و با تیرک دنبال شده و حالت با تیرک نیز به دو تیپ A و B تقسیم شده است. کلیه آزمایش‌ها با دو دبی ۱ و ۲/۳ لیتر بر ثانیه اجرا شده‌اند. زمانی که دبی آب کانال ۱ لیتر بر ثانیه باشد، عمق جریان ۱/۱ سانتی‌متر و عدد فرود برابر با ۱/۳ و زمانی که میزان دبی آب ۲/۳ لیتر بر ثانیه باشد، عمق جریان ۱/۹

سانتی‌متر و عدد فرود ۱/۴ بوده است. در این آزمایش از ۵۰ الوار استفاده شده است که یک‌بار برای ۵۰ ثانیه و در هر ثانیه یک الوار (جمعاً ۵۰ الوار) و یک‌بار نیز ۵۰ الوار به‌طور همزمان وارد جریان شده‌اند. در هر آزمایش درصد عبور الوارها از سازه پل محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. در مطالعه حاضر و در راستای ارزیابی عملکرد نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی حرکت اجسام شناور در آب، حالت بدون تیرک و حالت تیپ B آزمایش‌های هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018) انتخاب شده است.



شکل ۴- تیپ آرایش تیرک‌های فولادی پیش از پایه‌های پل در مدل آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)

Fig. 4- Configuration of steel guide beams installed upstream of bridge piers in the experimental model of Harada *et al.*, (2018)

و سایر موانع موجود در مسیر جریان را شبیه‌سازی نماید. در این نرم‌افزار، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش حجم محدود و روی شبکه‌های منظم مستطیلی گسسته‌سازی می‌شوند. اگرچه مبنای حل عددی در FLOW-3D روش حجم محدود است، اما به دلیل استفاده از شبکه‌های ساخت‌یافته، فرم ظاهری معادلات گسسته‌شده شباهت زیادی به روابط حاصل از روش تفاضل محدود دارد. بر این اساس، FLOW-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتگی^۱، مدل‌های مختلف آشفتگی استفاده می‌شوند که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل‌های

معرفی مدل عددی

نرم‌افزار FLOW-3D یکی از مدل‌های عددی قدرتمند برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده هیدرودینامیکی است و در تحلیل جریان‌های سه‌بعدی، ناپایا، دارای سطح آزاد و هندسه‌های پیچیده کاربرد گسترده‌ای دارد. از قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار می‌توان به شبیه‌سازی حرکت انواع اجسام شناور در محیط‌های آبی، از جمله الوارهای چوبی، زباله‌ها و شناورها اشاره کرد. FLOW-3D قادر است اثر نیروهای مختلف مانند نیروهای هیدرودینامیکی، نیروی باد و نیروهای اصطکاکی را بر حرکت اجسام شناور لحاظ کند و همچنین اندرکنش آنها با سازه‌های هیدرولیکی مانند پل‌ها، سرریزها

¹ Turbulent Flow

و نیاز به سرعت محاسبات مناسب‌تر است، در حالی که LES برای مطالعات دقیق هیدرودینامیکی و تحلیل رفتار موضعی جریان، به‌ویژه در مسائل مرتبط با حرکت و تجمع واریزه‌های چوبی، دقت بالاتری ارائه می‌دهد. در پژوهش حاضر، استفاده همزمان از مدل‌های RNG و LES در نرم‌افزار FLOW-3D این امکان را فراهم می‌کند تا ضمن مقایسه دقت و عملکرد آنها، قابلیت هر مدل در شبیه‌سازی رفتار واریزه‌های چوبی و ارزیابی خطر گرفتگی دهانه پل‌ها بررسی گردد.

به طور کلی حرکت جسم صلب با شش درجه آزادی، به حرکت انتقالی و حرکت چرخشی تحت مرکزیت جرم تقسیم می‌شود که FLOW-3D قادر مدلسازی آن است. این تقسیم بندی حرکت با معادلات نیرو و گشتاور به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$F = m \frac{d\vec{U}_G}{dt} \quad (1)$$

$$\vec{T}_G = [j] \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times ([j] \cdot \vec{\omega}) \quad (2)$$

که در آن، (F) نیروی کل وارد بر جرم، (M) جرم جسم متحرک، ($\vec{U}_G$) سرعت مرکز جرم جسم متحرک، ($\vec{T}_G$) گشتاور کلی تحت مرکزیت جرم جسم متحرک، ([j]) تانسور ممان اینرسی، ($\vec{\omega}$) سرعت زاویه ای است.

معادلات پیوستگی و مومنوم حاکم بر حرکت اجسام متحرک در نرم‌افزار Flow-3D به صورت زیر هستند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{V_f}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \vec{u} A_f) = - \frac{\partial V_f}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن، (V_f) نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و (A_f) نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان و (ρ) چگالی سیال و ($\vec{u}$) سرعت سیال است.

از آنجایی که سمت راست معادله (۴) به هنگام حرکت جسم متحرک از یک حجم کنترل دقت بیشتری دارد، بهتر است با عبارت فوق در معادله (۳) جایگزین شود.

k-ε، RNG¹ و LES² اشاره کرد. هر یک از این مدل‌ها مبانی تئوری، دقت و هزینه محاسباتی متفاوتی دارد و انتخاب آنها به نوع مسئله، مقیاس جریان و هدف مطالعه بستگی دارد. مدل RNG در واقع نسخه توسعه‌یافته‌ای از مدل آشفتگی-k-ε است. در این مدل، اثرهای آشفتگی با استفاده از معادلات میانگین‌گیری شده ناویر-استوکس شبیه‌سازی می‌شود. مدل RNG نسبت به مدل استاندارد k-ε در شبیه‌سازی جریان‌های دارای انحنای، جدایش جریان، گردابه‌های قوی و تغییرات شدید سرعت، توانایی بیشتری دارد. این مدل به دلیل پایداری مناسب، زمان محاسبات کمتر و نیاز پایین‌تر به توان پردازشی، در بسیاری از مسائل مهندسی هیدرولیک و شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌ها و اطراف سازه‌ها به کار می‌رود. با این حال، از آنجا که مدل RNG مبتنی بر میانگین‌گیری زمانی است، قادر به نمایش مستقیم ساختار واقعی گردابه‌های بزرگ و رفتار لحظه‌ای آشفتگی نیست. در مقابل، مدل LES یا شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، یکی از دقیق‌ترین روش‌های مدلسازی آشفتگی محسوب می‌شود. در این روش، گردابه‌های بزرگ و اصلی جریان به صورت مستقیم حل می‌شود و تنها گردابه‌های کوچک مقیاس مدل‌سازی می‌شوند. به همین دلیل، LES توانایی بالایی در بازنمایی رفتار واقعی جریان‌های پیچیده، ناپایدار و سه‌بعدی دارد. این مدل به‌ویژه در بررسی حرکت اجسام شناور، اندرکنش جریان با موانع، تشکیل گردابه‌ها و تحلیل پدیده‌هایی مانند تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه پل‌ها عملکرد بسیار مناسبی دارد. با این همه، LES به شبکه‌بندی بسیار ریز، گام زمانی کوچک و توان پردازشی بالا نیاز دارد و هزینه محاسباتی آن نسبت به مدل RNG بسیار بیشتر است. به طور کلی، تفاوت اصلی این دو مدل در نحوه شبیه‌سازی آشفتگی است. مدل RNG آشفتگی را به صورت میانگین‌گیری شده و ساده‌تر حل می‌کند، در حالی که LES بخش عمده‌ای از ساختار واقعی گردابه‌ها و نوسان‌های جریان را مستقیماً شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین، مدل RNG برای مطالعات مهندسی با مقیاس بزرگ

² Large Eddy Simulation

¹ Re-Normalization Group

که در آن، (V_F) نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و (ρ) چگالی سیال است. مولفه‌های سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) هستند. (A_x) نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت (x) است، (A_z) و (A_y) به طور مشابه نسبت سطوح جریان در جهات (z) و (y) هستند. (R) و (ξ) مربوط به نوع سیستم مختصات هستند در مختصات کارتزین $R=1$ و $\xi=0$ است.

روش شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، از نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان در یک کانال مستطیلی، انتقال الوارهای شناور و نحوه تعامل آنها با پل در دو حالت بدون تیرک و مجهز به تیرک‌های هدایت‌کننده تیپ B استفاده شد. هندسه کانال، پل و تیرک‌ها بر اساس مدل آزمایشگاهی و با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD ترسیم و سپس به محیط FLOW-3D منتقل گردید (شکل ۵). خواص فیزیکی سیال (آب)، ویژگی‌های الوارها از جمله چگالی، و همچنین شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان تعریف شدند.

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} = \vec{U}_{obj} \cdot (\vec{n} S_{obj}) / V_{cell} \quad (4)$$

که در آن، $(\vec{U}_{obj})$ بردار سرعت جسم متحرک در سلول مش‌بندی شده، $(\vec{n})$ بردار واحد نرمال بر سطح جسم، (S_{obj}) مساحت مؤثر بخش از سطح جسم واقع در سلول محاسباتی و V_{cell} حجم سلول محاسباتی است. این رابطه بیان می‌کند که تنها مؤلفه سرعت عمود بر سطح جسم در تغییر حجم اشغال‌شده توسط جسم و در نتیجه تغییر کسر حجمی سیال نقش دارد.

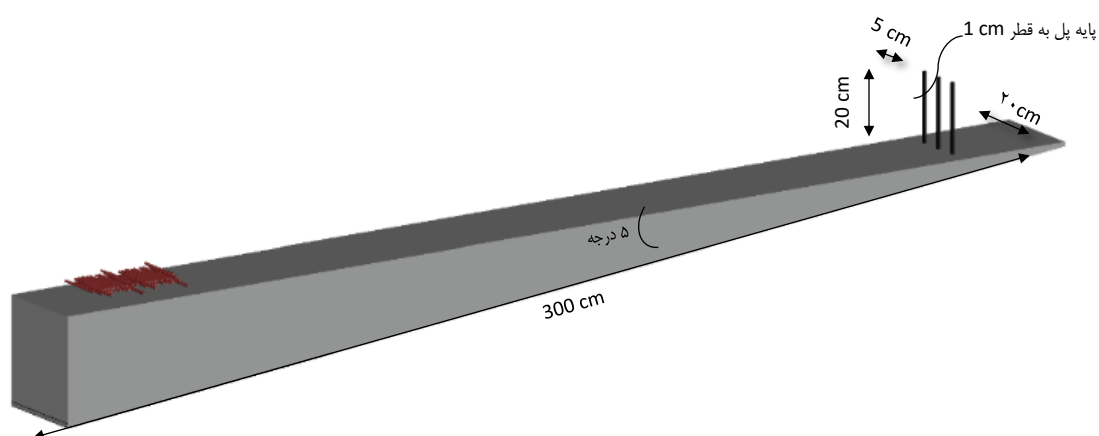
معادله مومنوم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (\vec{u} A_f \cdot \nabla u) = -\frac{1}{\rho} [\nabla p + \nabla \cdot (\tau A_f)] + \vec{G} \quad (5)$$

که در آن، (p) فشار، (τ) تانسور تنش، $(\vec{G})$ گرانش و $(\vec{u})$ سرعت مرزی دیواره‌های جسم در حال حرکت است.

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم پیروی می‌کند و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. به صورت کلی معادله ۶ به دست می‌آید:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

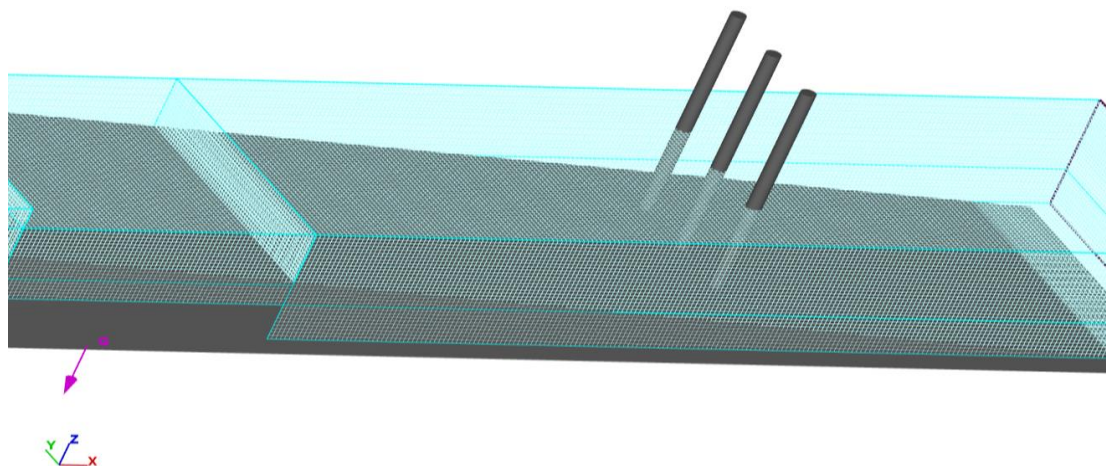


شکل ۵ - نمایش شماتیک مدل آزمایشگاهی مدل شده در نرم افزار اتوکد و معرفی شده به مدل FLOW-3D

Fig. 5- Schematic representation of the laboratory model, modeled in AutoCAD and imported into the FLOW-3D model

شبیه‌سازی عددی انتقال واریزه‌های چوبی در جریان آزاد مستلزم استفاده از شبکه‌بندی مناسب به منظور حل دقیق معادلات حاکم و بازنمایی صحیح هندسه اجسام شناور است. در این مطالعه، از چندین بلوک شبکه محاسباتی با ابعاد

سلول $3 \times 3 \times 3$ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۶). انتخاب این اندازه شبکه با توجه به ضخامت ۳ میلی‌متری الوارها بود که کوچک‌ترین بعد هندسی مدل محسوب می‌شد. استفاده از سلول‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر منجر به نمایش نامناسب هندسه الوارها و کاهش دقت شبیه‌سازی شد، در حالی که استفاده از شبکه‌های ریزتر، اگرچه دقت محاسبات را اندکی افزایش داد، اما موجب افزایش چشمگیر حجم محاسبات و زمان شبیه‌سازی شد. نتایج حساسیت سنجی شبکه محاسباتی مدل تهیه شده به ابعاد سلول‌های شبکه در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۶- نمایی از مش بندی کانال مدل‌سازی شده در نرم افزار FLOW-3D
Fig. 6- View of the meshed channel model in FLOW-3D software

نتایج تحلیل استقلال شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان با دبی ۱ لیتر بر ثانیه و ورود همزمان ۵۰ واریزه چوبی نشان داد که با کاهش اندازه سلول از ۳ به ۲ میلی‌متر، میزان عبور واریزه‌های چوبی تنها حدود ۱ درصد افزایش یافت، در حالی که تعداد سلول‌های محاسباتی از حدود ۱/۱ میلیون به ۲/۲ میلیون سلول افزایش یافت و در نتیجه، زمان اجرای شبیه‌سازی و هزینه محاسباتی به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. از سوی دیگر، استفاده از شبکه با اندازه

سلول ۴ میلی‌متر، به دلیل بزرگ‌تر بودن ابعاد سلول نسبت به کوچک‌ترین بعد هندسی الوارها، موجب بازنمایی نامناسب هندسه اجسام شناور، کاهش دقت در شبیه‌سازی اندرکنش جریان و واریزه‌ها و در نهایت کاهش دقت نتایج گردید. بنابراین، با توجه به تعادل مناسب میان دقت شبیه‌سازی و هزینه محاسباتی، شبکه با ابعاد سلول $3 \times 3 \times 3$ میلی‌متر به‌عنوان شبکه بهینه برای شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب شد.

جدول ۱ - نتایج تحلیل حساسیت شبکه محاسباتی نسبت به اندازه سلول

Table 1- Results of the Grid Sensitivity Analysis for Different Cell Sizes

زمان محاسبات (ساعت) Computational Time(hr)	درصد عبور واریزه‌های چوبی Percentage of Woody Debris Passage	تعداد سلول Number of cells	اندازه سلول Cell Size
۲/۳	۱۴	۶۴۰۰۰۰	۴
۵/۱	۲۰	۱۱۰۰۰۰۰	۳
۱۷/۸	۲۲	۲۲۰۰۰۰۰	۲

شایان ذکر است، به دلیل شیب نسبتاً زیاد کانال و یک بلوک شبکه یکنواخت برای کل دامنه محاسباتی، تعداد سلول‌ها را به حدود ۲/۶ میلیون افزایش می‌داد. در چنین اختلاف ارتفاع قابل توجه بین ابتدا و انتهای مدل، استفاده از

شرایطی بخش قابل توجهی از سلول‌ها در نواحی فاقد جریان قرار می‌گرفتند و عملاً نقشی در محاسبات نداشتند. بنابراین، به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی و زمان شبیه‌سازی، دامنه محاسباتی به چندین بلوک شبکه تقسیم شد تا ضمن حفظ دقت نتایج، کارایی محاسبات نیز افزایش یابد.

• برای مرزهای نفوذناپذیر (دیواره‌ها و کف کانال) از شرط مرزی دیوار^۱ استفاده شد.

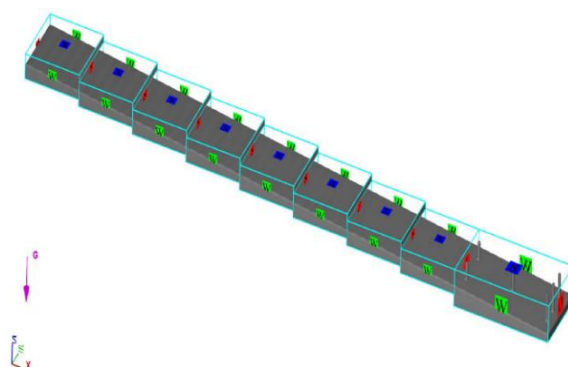
• برای مرز ورودی از شرط مرزی نرخ جریان^۲ با معرفی دبی جریان و عمق آب مطابق جدول (۲) استفاده شد.

جدول ۲ - مشخصات جریان معرفی شده به مرز ورودی مدل عددی

Table 2- Flow Conditions Assigned to the Numerical Model Inlet Boundary

دامنه دبی جریان معرفی شده به مرز ورودی مدل Range of Flow Discharge Applied at the Model Inlet Boundary	دامنه عمق جریان معرفی شده به مدل Range of Flow Depth Applied to the Model
۱ تا ۲/۳ لیتر بر ثانیه	۱/۱ تا ۱/۹ سانتی‌متر

- برای مرز خروجی از شرط مرزی خروجی^۳ استفاده شد.
- برای مرز بالای شبکه محاسباتی مدل، شرط مرزی مرز متقارن^۴ اعمال شد. پروفیل سطح آب در کانال، توسط مدل و بر اساس روش حجم سیال^۵ تعیین خواهد شد.
- مرزهای مشترک مش بلوک‌ها از شرط مرزی متقارن به منظور تداوم و یکنواختی جریان در بین بلوک‌ها استفاده شد
- در شکل (۷)، نمایی از نحوه معرفی شرط مرزی‌ها در مدل عددی نشان داده شده است.



شکل ۷ - نمایی از شرایط مرزی معرفی شده به هر وجه مدل مورد بررسی در نرم افزار FLWO-3D

Fig. 7- View of the boundary conditions assigned to each face of the computational domain in the FLOW-3D model

مطابق شرایط مدل آزمایشگاهی، واریزه‌های چوبی در نزدیکی سطح آزاد آب رها شدند و همین شرایط در مدل اولیه واریزه‌ها نسبت به جهت جریان می‌تواند بر مسیر

⁴ Symmetry
⁵ Volum of Fluid (VOF)

¹ wall
² Volume Flow Rate
³ Outflow

این، بررسی عملکرد سامانه پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و شرایط نزدیک‌تر به نمونه واقعی می‌تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

واسنجی و صحت مدل عددی

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی FLOW-3D و انتخاب مدل آشفتگی مناسب، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) مقایسه شد. معیار اصلی مقایسه، درصد عبور الوارهای چوبی از بین پایه‌های پل بود. برای این منظور، شبیه‌سازی‌ها برای دو دبی ۱ و ۲/۳ لیتر بر ثانیه و با ورود همزمان ۵۰ الوار به جریان، با استفاده از دو مدل آشفتگی RNG و LES صورت گرفت. شکل (۸) نمونه‌ای از فرآیند حرکت الوارها، تجمع آنها در بالادست پل و یا عبور آنها از دهانه پل را در شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار جانبی FLOW-3D به نام FLOW-3D POST نشان می‌دهد. پس از شبیه‌سازی‌ها، تعداد الوارهای عبور کرده از بین پایه‌های پل شمرده و درصد عبور آنها تعیین شد.

شکل (۹) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی را برای شرایط ورود همزمان ۵۰ الوار نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها، درصد خطای نسبی $(Error = |P_{num} - P_{exp}| / P_{exp} \times 100)$ بین نتایج عددی و آزمایشگاهی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در دبی ۱ لیتر بر ثانیه، خطای مدل LES حدود ۵ درصد و خطای مدل RNG حدود ۵۰ درصد است. در دبی ۲/۳ لیتر بر ثانیه، خطای مدل LES و RNG به ترتیب حدود ۳۰ و ۵۰ درصد به دست آمد. بنابراین، مدل LES در هر دو شرایط مورد بررسی تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشته‌است و به طور متوسط حدود ۳۳ درصد خطای کمتری نسبت به مدل RNG نشان می‌دهد. میانگین خطای نسبی مدل LES در دو حالت بررسی‌شده برابر با ۱۷/۵ درصد به دست آمد. اگرچه تعداد حالات موجود برای اعتبارسنجی محدود است، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل LES توانایی مناسبی در بازتولید روند کلی انتقال و عبور الوارهای شناور از دهانه پل را دارد و عملکرد آن نسبت به مدل RNG به‌طور

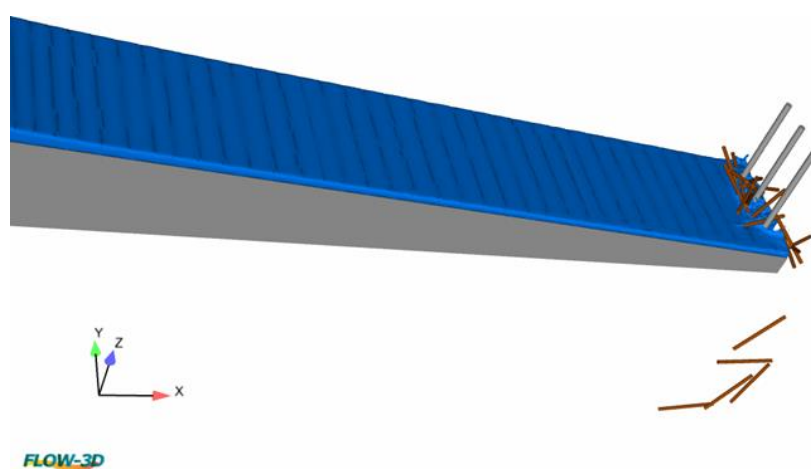
حرکت، احتمال برخورد با پایه‌های پل و در نهایت میزان انسداد تأثیرگذار باشد، چهار آرایش مختلف برای موقعیت زاویه‌ای اولیه واریزه‌ها در نظر گرفته شد. در این راستا، واریزه‌ها به ترتیب با زاویه‌های صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نسبت به جهت جریان وارد کانال شدند. برای هر یک از این حالات، شبیه‌سازی به صورت مستقل اجرا و درصد عبور واریزه‌ها از دهانه پل محاسبه گردید. به منظور کاهش اثر شرایط اولیه و افزایش قابلیت تعمیم نتایج، میانگین درصد عبور حاصل از تمامی تکرارها به عنوان نتیجه نهایی هر سناریو گزارش شد.

نتایج و بحث

در این بخش پس از تهیه هندسه مدل و معرفی خصوصیات جریان و الوارهای چوبی و همچنین شرایط مرزی، به تحلیل یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته می‌شود. هدف اصلی، بررسی تأثیر تیرک‌های فولادی بر بهبود عبور واریزه‌های چوبی از میان پایه‌های پل و کاهش احتمال انسداد دهانه‌ها است. این تحلیل شامل مقایسه میان آرایش‌های مختلف تیرک‌ها، بررسی دبی‌های متفاوت، نحوه ورود واریزه‌ها، و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی پژوهش هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) است. یکی از محدودیت‌های این پژوهش، استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک برای واسنجی مدل عددی است. با توجه به عمق کم جریان (۱/۱ تا ۱/۹ سانتی‌متر) و قطر ۳ میلی‌متری واریزه‌های چوبی، احتمال تأثیرپذیری نتایج آزمایشگاهی از اثرهای مقیاس، نیروهای لزوجتی و کشش سطحی وجود دارد. با این حال، در مدل عددی حاضر از شبکه محاسباتی با ابعاد سلول $3 \times 3 \times 3$ میلی‌متر، معادل کوچک‌ترین بعد هندسی واریزه‌ها، استفاده شد تا هندسه و حرکت اجسام شناور با دقت مناسب بازنمایی شود. از آنجا که هدف اصلی پژوهش، مقایسه عملکرد نسبی آرایش‌های مختلف تیرک‌های هدایت‌کننده بوده است، انتظار می‌رود تأثیر این محدودیت بر روند کلی نتایج و مقایسه سناریوها محدود باشد. با وجود

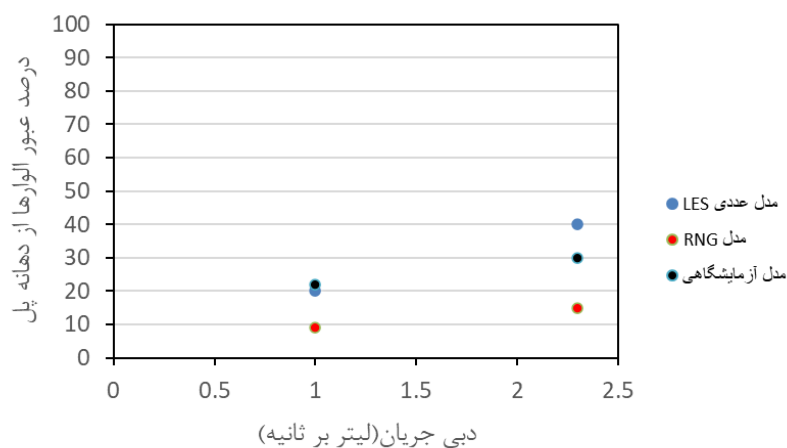
محسوسی بهتر است. بر این اساس، مدل LES به عنوان مدل آشفته‌گی برتر برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. برای صحت سنجی مدل LES، شبیه‌سازی‌ها برای ورود ۵۰ الوار به صورت تک به تک نیز به اجرا درآمد. نتایج این مرحله در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در دبی ۱ لیتر بر ثانیه، خطای مدل عددی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی در حدود ۳۰ درصد و در دبی

۲/۳ لیتر بر ثانیه، در حدود ۶ درصد است. متوسط خطای مدل در حدود ۱۸ درصد تعیین شده است. نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل نشان داد که خطای مدل LES در شبیه‌سازی حرکت الوارهای چوبی دامنه ۱۷ تا ۱۸ درصد نسبت به نتایج مشاهداتی متغیر است. بنابراین پارامترهای معرفی شده به مدل نیز برای مدل‌سازی‌های دیگر لحاظ شد.



شکل ۸- نمایی از شبیه‌سازی حرکت واریزه‌های چوبی از محدوده پل بدون استفاده از تیرک‌های حفاظتی

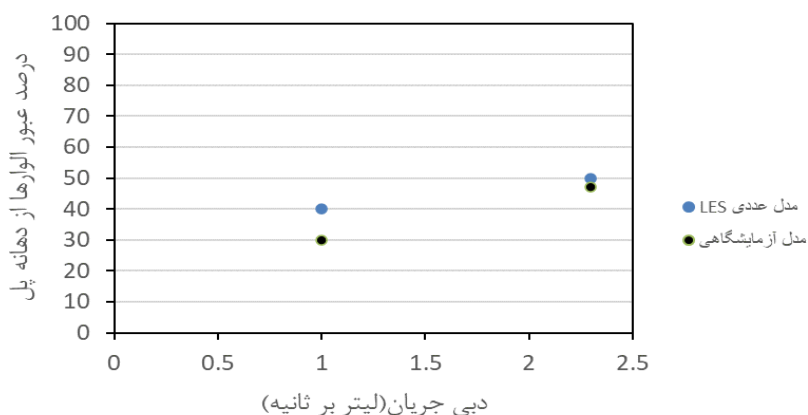
Fig. 8- View of the simulated movement of woody debris through the bridge opening without protective steel piles



شکل ۹- نمودار مقایسه بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای شرایط ورود ۵۰ الوار به صورت همزمان

Fig. 9- Comparison between numerical and experimental results for the simultaneous release of 50 logs

ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی...



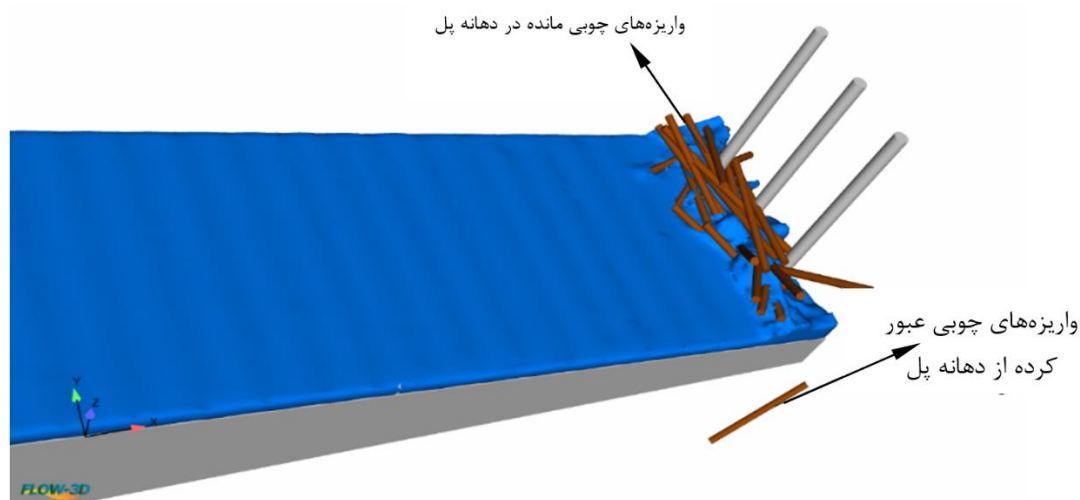
شکل ۱۰- نمودار مقایسه بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای شرایط ورود ۵۰ الوار به صورت تک‌به‌تک

Fig. 10- Comparison between numerical and experimental results for the sequential release of 50 logs

دهانه‌های پل و در نتیجه افزایش تراز آب و پس‌زدگی جریان در بالادست سازه شده‌اند. در مقابل، مطابق شکل (۱۲)، استفاده از تیرک‌های هدایت‌کننده با آرایش تیپ B موجب اصلاح مسیر حرکت الوارها و هدایت آنها به سمت دهانه‌های پل شده است. در این شرایط، الوارها با حداقل برخورد و گیر افتادگی در پایه‌های پل از دهانه‌ها عبور کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری تیرک‌های هدایت‌کننده نقش مؤثری در کاهش تجمع الوارها در بالادست پل و افزایش میزان عبور آنها از دهانه‌های پل دارد و در نتیجه خطر انسداد و پس‌زدگی جریان را به طور محسوسی کاهش می‌دهد.

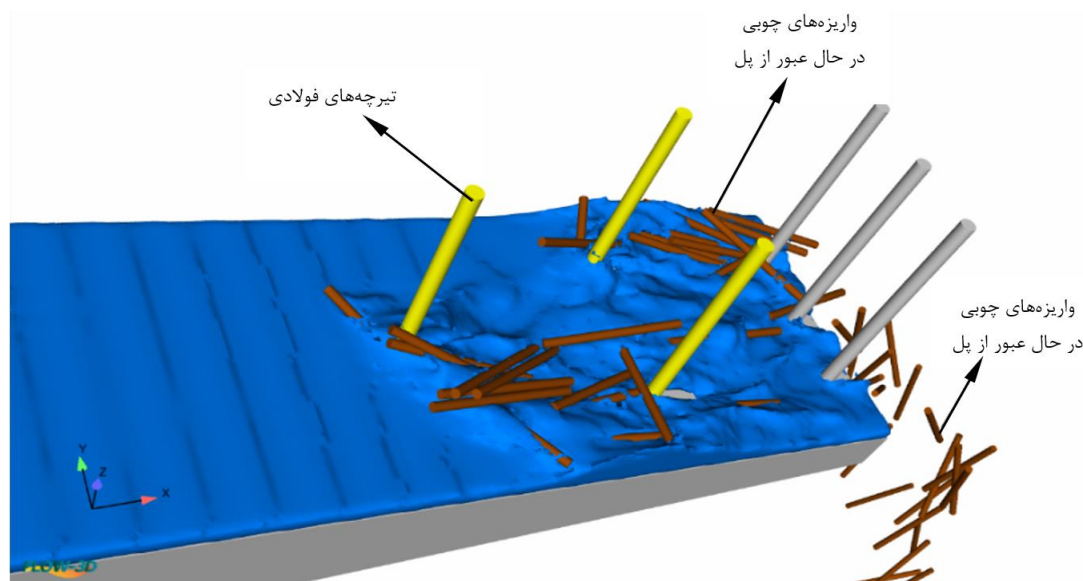
نتایج بررسی سناریوهای تعریف شده

به منظور بررسی اثر استفاده از تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده الوارهای چوبی در بالادست پل، شبیه‌سازی‌ها در دو سناریوی «بدون تیرک هدایت‌کننده» و «با تیرک هدایت‌کننده» اجرا شد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نتایج شبیه‌سازی حرکت همزمان ۵۰ الوار چوبی در کانال و نحوه مواجهه آنها با هر یک از سناریوهای مورد بررسی را در محیط نرم‌افزار FLOW-3D POST نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در حالت بدون تیرک‌های هدایت‌کننده (تیپ A)، تعداد قابل توجهی از الوارها در بالادست پل تجمع یافته و موجب انسداد



شکل ۱۱- نتیجه شبیه‌سازی حرکت واریزه‌های چوبی در کانال و عبور از محدوده پل در شرایط استفاده نکردن از تیرک‌های حفاظتی

Fig. 11- Simulation results of woody debris movement in the channel under bridge conditions without protective steel piles

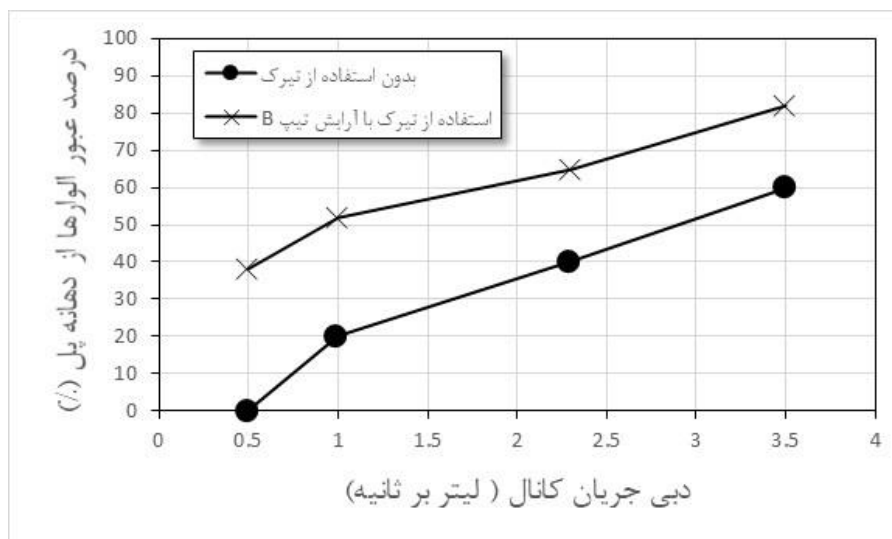


شکل ۱۲ - نتیجه شبیه‌سازی حرکت واریزه‌های چوبی در کانال و عبور از محدوده پل در شرایط وجود تیرک‌های حفاظتی با آرایش تیپ B
 Fig. 12- Simulation of woody debris movement in the channel and passage through the bridge reach in the presence of Type B protective pile arrangement

آنها در صورت ورود همزمان الوارها به داخل جریان می‌شود. شکل (۱۴) روند تغییرات درصد عبور الوارهای چوبی در دهانه‌های پل در شرایط بدون تیرک و با تیرک‌های هدایت کننده را برای ورود ۵۰ الوار به صورت منفرد (تک به تک) به داخل کانال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده نکردن از تیرک‌های هدایت کننده ۲۰ تا ۷۰ درصد برای دبی ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه است. در حالی که دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده از تیرک‌های هدایت کننده تیپ B، ۷۰ تا ۹۰ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از تیرک‌ها مطابق تیپ B باعث کاهش گرفتگی به میزان متوسط ۳۶ درصد بیشتر نسبت به حالت استفاده نکردن از آنها در صورت ورود منفرد الوارها به داخل جریان می‌شود.

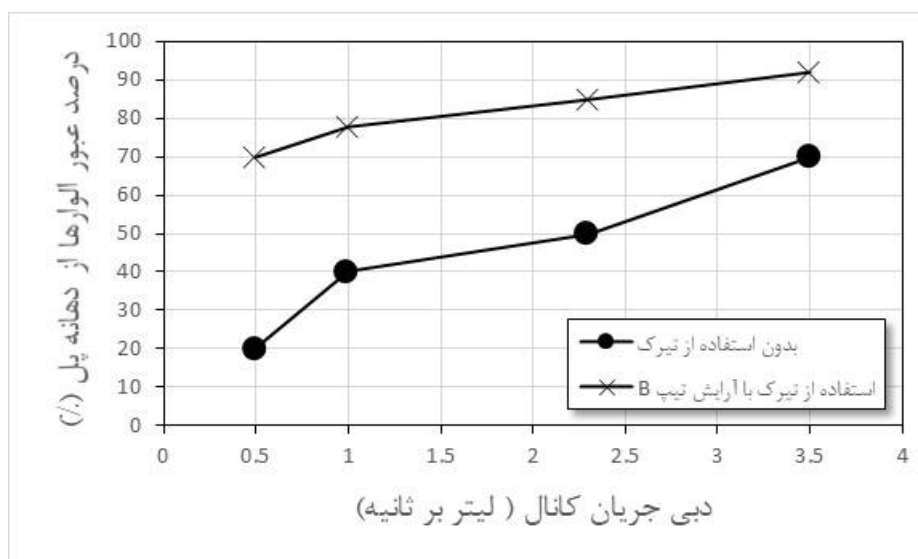
به منظور گسترش دامنه دبی‌های جریان نسبت به مدل آزمایشگاهی، دو دبی ۰/۵ و ۳/۵ مترمکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۳) روند تغییرات درصد عبور الوارهای چوبی در دهانه‌های پل در شرایط بدون تیرک و با تیرک‌های هدایت کننده را برای ورود ۵۰ الوار به صورت همزمان به داخل کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده نکردن از تیرک‌های هدایت کننده، صفر تا ۶۰ درصد برای دبی ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه است. در حالی که دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده کردن از تیرک‌های هدایت کننده تیپ B، ۳۸ تا ۸۲ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از تیرک‌ها مطابق تیپ B باعث کاهش گرفتگی به میزان متوسط ۲۹/۵ درصد بیشتر نسبت به حالت استفاده نکردن از

ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی...



شکل ۱۳ - نمودار درصد عبور ۵۰ واریزه چوبی وارده شده به صورت همزمان به داخل جریان با دبی‌های مختلف و در شرایط استفاده کردن و یا استفاده نکردن از تیرک‌های فولادی

Fig. 13- Comparison of the passage percentage of 50 simultaneously introduced woody debris elements under different flow discharges, with and without steel guide piles.

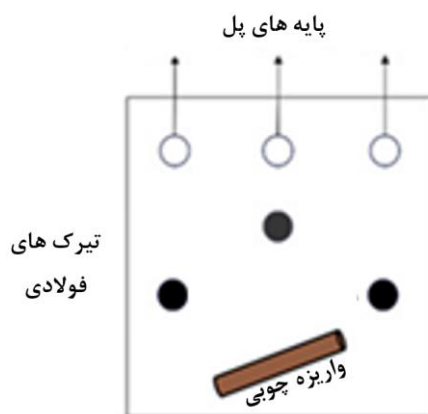


شکل ۱۴ - نمودار درصد عبور ۵۰ واریزه چوبی وارد شده به صورت منفرد (تک به تک) به داخل جریان با دبی‌های مختلف و در شرایط استفاده کردن و یا استفاده نکردن از تیرک‌های فولادی

Fig. 14- Comparison of the passage percentage of 50 individually introduced woody debris elements under different flow discharges, with and without steel guide piles.

در این مطالعه، آرایش جدیدی مطابق شکل (۱۵) و با پیشنهادی، آرایش تیرک‌ها به گونه‌ای نسبت به تیپ B نام تیپ C معرفی شد و با شبیه‌سازی عددی کارکرد آن جابه‌جا شده‌اند که دو تیرک در ردیف اول و یک تیرک تکی نسبت به تیپ B معرفی شده توسط هارادا و همکاران بین آن‌ها و پل قرار گرفته است. این تغییر آرایش به این دلیل بود که در تیپ B اولین برخورد واریزه‌های چوبی با یک (Harada et al., 2018) ارزیابی گردید. در تیپ C

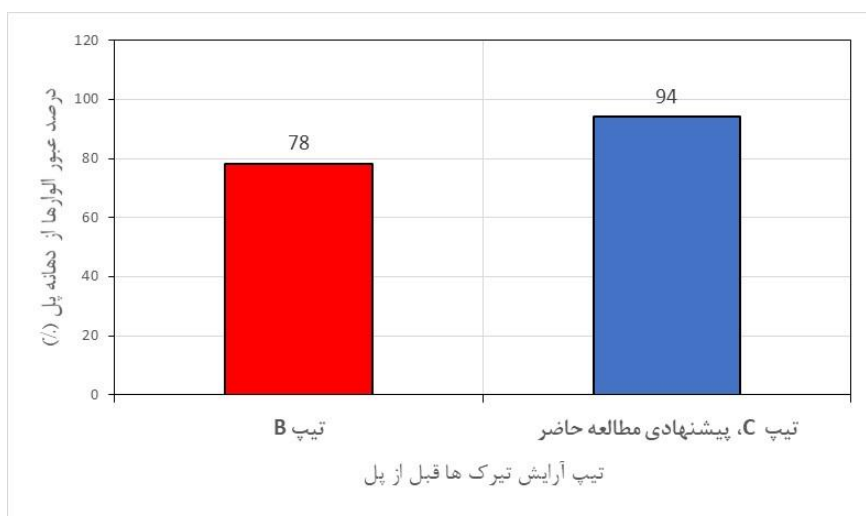
تیرک هدایت کننده منجر به تغییر زاویه واریزه‌های چوبی می‌شود، اما ردیف بعدی تیرک‌ها به دلیل فاصله زیاد از همدیگر تأثیر کمی در تغییر جهت مطلوب‌تر آن‌ها داشت. بنابراین، با جابه‌جایی این دو ردیف برخورد اولیه با دو تیرک فولادی می‌تواند به تغییر جهت واریزه‌ها کمک کند و اگر واریزه چوبی زاویه مناسبی برای عبور از دهانه پل نداشته باشد، تیرک تکی در ردیف بعدی نقش مهمی در هدایت آن خواهد داشت.



شکل ۱۵- آرایش تیرک‌های فولادی در تیپ C (تیپ پیشنهادی مطالعه حاضر)

Fig. 15- Configuration of steel guide piles in Type C arrangement (proposed in the present study)

به منظور مقایسه دو تیپ B و C با یکدیگر، شبیه‌سازی عددی با دبی ۲/۳ لیتر بر ثانیه و در شرایط ورود ۲۰ الوار چوبی به صورت همزمان به داخل کانال جریان اجرا شد. مطابق شکل (۱۶)، میزان عبور الوارهای چوبی از دهانه‌های پل برای تیپ B برابر ۷۸ درصد و برای تیپ C برابر ۹۴ درصد به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تیپ C عملکرد بهتری (۱۶ درصد بیشتر) نسبت به تیپ B دارد و تنها ۶ درصد از الوارهای چوبی از داخل دهانه‌های پل عبور نکرده‌اند.



شکل ۱۶- مقایسه درصد عبور ۲۰ الوار به صورت همزمان از دهانه پل تحت آرایش‌های مختلف قرارگیری تیرک‌های فولادی

Fig. 16- Comparison of the percentage of successful passage of 20 simultaneously released logs through the bridge opening under different steel guide-pile arrangements.

تغییر الگوی جریان و جابه‌جایی نواحی بازچرخش، موجب توزیع مناسب‌تر الوارها در عرض کانال و افزایش قابلیت عبور آنها از دهانه‌های پل می‌شود

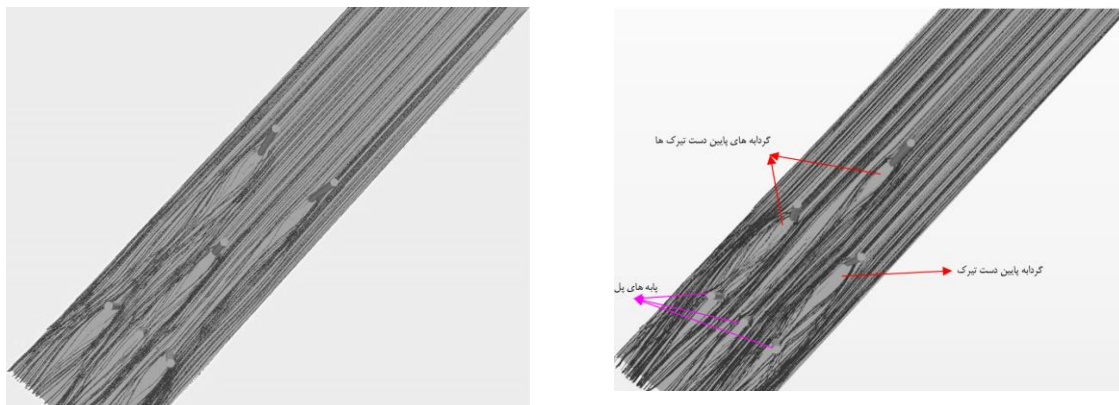
شکل (۱۸) میدان سرعت جریان در محدوده پل و تیرک‌های هدایت‌کننده را برای دو آرایش تیپ B و C به همراه مسیر حرکت واریزه‌های چوبی و نحوه عبور آنها از دهانه‌های پل نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۸-الف) مشاهده می‌شود، در آرایش تیپ B فاصله نسبتاً زیاد گردابه تشکیل‌شده در پایین‌دست تیرک اول تا پایه میانی پل سبب شده است این ناحیه بازچرخشی نتواند تا مجاورت پایه توسعه یابد. در نتیجه، جریان با سرعت بیشتری در اطراف پایه میانی عبور می‌کند و ناحیه‌ای با فشار کمتر در بالادست آن ایجاد می‌شود. این شرایط موجب همگرایی خطوط جریان به سمت پایه میانی نیز می‌شود و بخشی از واریزه‌های چوبی تحت تأثیر این الگوی جریان به سمت پشت پایه هدایت خواهد شد. در نتیجه، احتمال برخورد، تجمع و گیر افتادن واریزه‌ها در مجاورت پایه میانی افزایش می‌یابد. در مقابل، مطابق شکل (۱۸-ب)، در آرایش تیپ C گردابه تشکیل‌شده در پایین‌دست تیرک میانی تا نزدیکی پایه میانی گسترش می‌یابد و موجب کاهش سرعت جریان در این ناحیه می‌شود. کاهش سرعت جریان با افزایش نسبی فشار در بالادست پایه میانی همراه است و از تمرکز خطوط جریان در اطراف پایه جلوگیری می‌کند. در این شرایط، گردابه ایجادشده بین تیرک میانی و پایه پل به‌عنوان ناحیه-ای انحراف‌دهنده عمل می‌کند و مانع نزدیک شدن مستقیم واریزه‌های چوبی به پایه میانی می‌شود. در نتیجه، واریزه‌ها تحت تأثیر جریان اصلی به سمت دهانه‌های باز پل هدایت می‌شود و احتمال برخورد و ماندگاری آنها در اطراف پایه میانی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

به منظور ارزیابی دلیل بهبود عملکرد آرایش تیپ C (پیشنهادی مطالعه حاضر) نسبت به آرایش تیپ B (پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)، الگوی جریان در محدوده بالادست پل مورد شبیه‌سازی استخراج شد.

شکل (۱۷) الگوی خطوط جریان در اطراف تیرک‌های هدایت‌کننده و پایه‌های پل را برای دو آرایش B و C تیرک‌ها نشان می‌دهد. در هر دو حالت، عبور جریان از اطراف تیرک‌های فولادی موجب تشکیل نواحی جداسازی جریان و گردابه‌های بازچرخشی در پایین‌دست آنها شده است. این گردابه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت مسیر حرکت الوارهای شناور و نحوه توزیع آنها در عرض کانال دارند.

در آرایش تیپ B (یک تیرک در بالادست و دو تیرک در پایین‌دست)، گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت تیرک‌ها سبب تمرکز بخشی از خطوط جریان به سمت ناحیه مرکزی کانال و مجاورت پایه میانی پل شده‌اند (شکل ۱۷-الف). در نتیجه، احتمال هدایت الوارها به سمت پایه میانی پل افزایش یافته و برخورد آنها با پایه میانی و گیر افتادن در بالادست پل محتمل‌تر است. این وضعیت زمینه تجمع واریزه‌های چوبی در بالادست پل، کاهش سطح مؤثر عبور جریان و در نهایت افزایش خطر انسداد دهانه‌های پل را فراهم می‌کند.

در مقابل، در آرایش تیپ C (دو تیرک در بالادست و یک تیرک در موقعیت مرکزی و نزدیک به پایه میانی)، میدان جریان به گونه‌ای تغییر یافته است که گردابه تشکیل‌شده در پشت تیرک مرکزی به عنوان ناحیه محافظ عمل می‌کند و از تمرکز مستقیم خطوط جریان و الوارهای شناور در مجاورت پایه میانی جلوگیری خواهد کرد (شکل ۱۷-ب). در این حالت، مسیر حرکت الوارها به سمت دهانه‌های آزاد پل هدایت می‌شود و احتمال برخورد آنها با پایه میانی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، تیرک مرکزی با



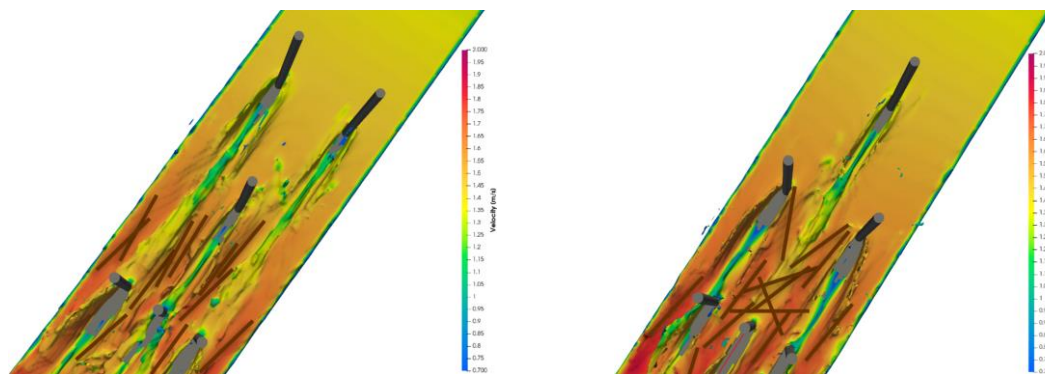
ب- الگوی خطوط جریان در مدل آرایش تیپ C تیرک‌های هدایت‌کننده

الف- الگوی خطوط جریان در مدل آرایش تیپ B تیرک‌های هدایت‌کننده

شکل ۱۷- مقایسه الگوی خطوط جریان در پایین دست تیرک‌های هدایت‌کننده واریزه‌های چوبی با آرایش مختلف

Fig. 17- Comparison of Streamline Patterns Downstream of Large-Wood Deflection Piles with Different Configurations

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که آرایش تیپ C با اصلاح ساختار میدان جریان و ایجاد ناحیه‌ای بازچرخشی محافظ در مقابل پایه میانی، عملکرد مؤثرتری در هدایت واریزه‌های چوبی به سمت دهانه‌های پل دارد و در مقایسه با آرایش تیپ B، خطر انسداد دهانه‌ها و تجمع واریزه‌ها در بالادست پل را کاهش می‌دهد.



ب- مدل آرایش تیپ C

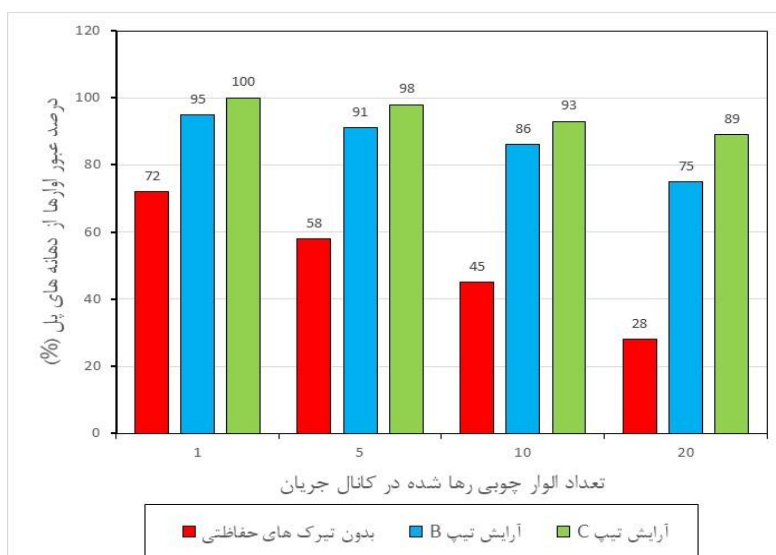
الف- مدل آرایش تیپ B

شکل ۱۸- مقایسه میدان سرعت جریان و الگوی حرکت واریزه‌های چوبی در محدوده پل و تیرک‌های هدایت‌کننده با آرایش‌های مختلف

Fig. 18- Comparison of Flow Velocity Distribution and Large-Wood Transport Patterns around the Bridge and Guiding Piles under Different Configurations

به منظور بررسی اثر تعداد الوارها بر عملکرد تیرک‌های هدایت‌کننده، چهار شبیه‌سازی دیگر برای پل بدون تیرک‌های هدایت‌کننده و با تیرک‌های هدایت‌کننده مطابق آرایش تیپ B و C اجرا شد. شبیه‌سازی‌ها برای دبی‌های ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه ورود همزمان ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ الوار چوبی در کانال طراحی شد. در مجموع ۱۶ شبیه‌سازی اجرا گردید و درصد عبور واریزه‌های چوبی از دهانه پل تعیین شد. متوسط درصد عبور الوارها برای تمامی دبی‌های شبیه‌سازی شده، در هر یک از سناریوهای مربوط به تعداد الوارهای رهاسده، محاسبه شد. شکل (۱۹) نتایج درصد عبور الوارها را برای هریک از سناریوهای، بر حسب تعداد الوارهای رهاسخ، را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با

افزایش تعداد الوارها از ۱ عدد به ۲۰ عدد، درصد عبور آن‌ها از میان پایه‌های پل بدون تیرک‌های حفاظتی به ترتیب از ۷۲ درصد به ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت، به‌طور متوسط ۵۱ درصد واریزه‌های چوبی از دهانه‌های پل عبور کرده‌اند. با به‌کارگیری تیرک‌های هدایت‌کننده تیپ B پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)، درصد عبور الوارها از داخل دهانه پل با افزایش تعداد الوارها از یک عدد به ۲۰ عدد، به ترتیب از ۹۵ درصد به ۷۵ درصد کاهش یافته است. در این حالت، به‌طور متوسط ۸۷ درصد واریزه‌های چوبی از دهانه‌های پل عبور کرده‌اند. با به‌کارگیری تیرک‌های هدایت‌کننده تیپ C، درصد عبور واریزه‌های چوبی از داخل دهانه پل با افزایش تعداد الوارها از یک عدد



شکل ۱۹- تاثیر نقش تعداد الوارها و آرایش تیرک‌های حفاظتی بر گذر واریزه‌های چوبی از دهانه پل

Fig. 19- Effects of log quantity and protective pile configuration on the passage of woody debris through the bridge opening

نتیجه‌گیری

دارد. بدین ترتیب، فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر قابلیت مدل‌سازی عددی سه‌بعدی برای تحلیل اندرکنش جریان، واریزه‌های شناور و سازه‌های هیدرولیکی تأیید گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در بالادست پل، با اصلاح مسیر حرکت واریزه‌ها و کاهش احتمال برخورد آن‌ها با پایه‌های پل، موجب افزایش قابل توجه درصد عبور الوارها و کاهش خطر گرفتگی دهانه‌ها می‌شود. همچنین مشخص شد که آرایش پیشنهادی تیپ

پژوهش حاضر با هدف بررسی قابلیت مدل عددی FLOW-3D در شبیه‌سازی انتقال واریزه‌های چوبی و ارزیابی عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها به‌اجرا در آمد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که مدل LES با میانگین خطای حدود ۱۸ درصد، توانایی مناسبی در بازنمایی رفتار واریزه‌های چوبی و فرآیند عبور یا تجمع آن‌ها در محدوده پل

C ارائه شده در این پژوهش نسبت به آرایش مرجع تیپ B، پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)، عملکرد بهتری دارد و با ایجاد ناحیه‌ای بازچرخشی محافظ در مجاورت پایه میانی پل، عبور واریزه‌های چوبی را تا ۱۶ درصد افزایش می‌دهد. این نتایج فرضیه دوم پژوهش را مبنی بر تأثیر آرایش تیرک‌ها بر عملکرد سامانه هدایت‌کننده نیز تأیید می‌کند. برای تحلیل انتقال واریزه‌های چوبی در مجاورت پل‌ها، تبیین هیدرودینامیکی عملکرد تیرک‌های هدایت‌کننده و ارائه آرایش جدید تیپ C به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش خطر انسداد پل‌ها است. نتایج نشان داد که علاوه بر تعداد تیرک‌ها، آرایش و جانمایی آن‌ها نسبت به پایه‌های پل نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار میدان جریان و عملکرد سامانه دارد؛ به گونه‌ای که آرایش پیشنهادی تیپ C با کاهش احتمال تجمع الوارها در اطراف پایه میانی و افزایش نرخ عبور آن‌ها از دهانه‌های پل، در مقایسه با حالت بدون تیرک و آرایش متداول، عملکرد هیدرولیکی مطلوب‌تری ارائه کرده و می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب برای طراحی یا بهسازی پل‌های واقع در رودخانه‌های مستعد انتقال واریزه‌های چوبی به کار گرفته شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، عملکرد این سامانه در مقیاس واقعی و تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف، همراه با ارزیابی هم‌زمان آب‌شستگی پایه‌ها، انتقال رسوب و پایداری هیدرولیکی سازه، بررسی شود تا زمینه تدوین دستورالعمل‌های جامع طراحی و مدیریت خطر انسداد پل‌ها فراهم گردد.

تعارض منافع نویسندگان
در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

منابع مالی
نویسنده مسئول تحقیق حاضر را در راستای توسعه نتایج طرح تحقیقاتی "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ابعاد هندسی سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی بر تله اندازی تنه درختان ورودی به رودخانه و تشدید خطرات سیلاب آزمایشگاهی" دفاع شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و ارائه راهکارهایی برای کاهش مخاطرات سیل انجام داده است و هیچ گونه حمایت مالی برای تالیف و انتشار آن دریافت نکرده است.

دسترسی به داده‌ها
همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول از نویسنده مسئول، در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان
تمامی نویسندگان در اجرای تحقیق و طراحی مقاله مشارکت داشته‌اند

تشکر و قدردانی
نویسندگان لازم می‌دانند از تمامی افرادی که در اجرای این پژوهش همکاری داشته‌اند، به ویژه مدیریت محترم بخش مهندسی رودخانه و سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، به دلیل حمایت‌ها و همکاری‌های ارزشمند، صمیمانه قدردانی نمایند.

منابع

- Bezzola, G.D. (2013), "management of driftwood during floods". Zurich, http://www.vaw.ethz.ch/people/fb/archive/fb_112_management_of_driftwood_during_floods.
- Flussbau, A. G. (2009). Schwemmh Holzstudie Sihl [Driftwood potential Sihl River]. Report Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürichs, Zürich.
- Gschnitzer, T., Gems, B., Aufleger, M., Mazzorana, B., & Comiti, F. (2015). On the evaluation and modelling of wood clogging processes in flood related hazards estimation. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3: River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources* (pp. 139-142). Springer International Publishing.
- Harada, N., Takayama, S., Satofuka, Y., Mizuyama, T., & Nakatani, K. (2017). Fundamental experiment using steel stakes to capture driftwood on an impermeable type sabo dam. *Journal of Japan Society of Civil*

- Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering). 73(4): 1351- 1356
- Harada, N. Nakatani, k. Satofuka, Y. and Mizuyama, t. (2018), "Experimental Study of the Use of Stakes to Prevent Driftwood and Natural Debris from Blocking Bridges". Symposium Proceedings of the INTERPRAENENT.
- Hauer, C., & Habersack, H. (2009). Morphodynamics of a 1000-year flood in the Kamp River, Austria, and impacts on floodplain morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(5), 654-682.
- Majtan, E., Cunningham, L.S., & Rogers, B.D. (2022). Experimental and Numerical Investigation of Floating Large Woody Debris Impact on a Masonry Arch Bridge. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 911.
- Mansouri, K., Ahadian, J. (2016). Blockage of Piano Key Weirs in Debris Flow with Individual Experiments, *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), pp. 163-172. doi: 10.22055/ jise.2016.12352.
- Poppema, D. W., Burghardt, L., Benet, L., Wüthrich, D., Klopries, E.-M., Dewals, B., & Erpicum, S. (2025). Bridge clogging in Belgium and Germany during the 2021 floods. *Water Resources Research*, 61, e2024WR039218. <https://doi.org/10.1029/2024WR039218>
- Rostami, M., Rouhani, N., & Sheibani, H. R. (2018). Experimental investigation of the effect of bridge geometric configuration on the probability of blockage by floating woody debris. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(2), 171–181. (In Persian).
- Rostami, M., & Goodarzi, F. (2019). "Three-dimensional simulation of woody debris transport in rivers." Proceedings of the 15th Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Iran.
- Sendlhofer, A. (2010). Physical Scale Model Investigations of Large Wood Clogging at a Bridge over the Ötztaler Ache River, Sölden, Tyrol, Austria. Institute of Hydraulic Engineering, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria.
- Schmocker, L., & Hager, W.H., (2011). Probability of Drift Blockage at Bridge Decks . *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(4), 470-479.
- Schalko, L , Schmocker L. (2015), "River Driftwood Management". Zurich, http://www.vaw.ethz.ch/people/fb/ischalko/projects/data/fb_870_River-Driftwood-Management
- Simizu, Y., Osada, K. (2007). Numerical experiments on the accumulation process of driftwoods around piers by using a DEM-flow coupling model. *PROCEEDINGS OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 51, 829-834.
- Shimizu, Y., & Osada, K. (2007). Numerical experiments on accumulation process of driftwoods around piers by using a DEM-flow coupling model. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 51, 829–834.