Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538

Research Article

Modeling of Scour Downstream of the Triangular Labyrinth Spillway Using Flow-3D Software

Amir Ghamatloo[a,*], Saeed Abbasi [a]

[a] *Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-02-21
Revised: 2025-05-18
Accepted: 2025-09-02

Keywords:

Local scour;
Energy dissipation;
Jump characteristics;
Numerical model;
Flow-3D.

ABSTRACT

In this paper, the results of scour depth (Ds) and scour pit length (Ld) are compared with the experimental results conducted by Elnikhely and Fathy at 4 different discharges, 0.007, 0.008, 0.009 and 0.010 m3/s. The dimensionless parameters are the ratio of scour depth to the depth of the outfall (Yt), i.e. Ds/Yt, and the ratio of scour pit length to the depth of the outfall, i.e. Ld/Yt. It is observed that with increasing discharge, the maximum values of the dimensionless ratios Ds/Yt and Ld/Yt have a decreasing trend. This is because with increasing discharge, the depth of the outfall increases. This research showed that the numerical model has a good ability to simulate the sediment transport and scour process downstream of the triangular convoluted spillway. The numerical results are in good agreement with the experimental results and the rate of change of the scour pit at the bottom of the spillway is close to zero. With increasing discharge, the maximum values of the depth and length of the scour pit have decreased. On average, the difference between the numerical and experimental results is less than 5%. It can be concluded that there is a good agreement between the results. Numerical simulation of physical phenomena allows for a more detailed study of the flow field, velocity vectors and pressure contours, which is also discussed in this article.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36964.2814

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: Amir.ghamatloo@znu.ac.ir

How to cite this article:
Ghamatloo, A. & Abbasi, S., "Modeling of scour downstream of the triangular labyrinth spillway using Flow-3D software." Journal of Modeling in Engineering, 24 85 (2026): 251–264, doi: 10.22075/jme.2025.36964.2814

مقاله پژوهشی

مدلسازی آبشستگی پایین دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D

امیر قامتلو [1*]، سعید عباسی [1]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

واژگان کلیدی:
آبشستگی موضعی،
مشخصات پرش،
استهلاک انرژی،
مدل عددی،
Flow-3D.

چکیده

در مقالهٔ حاضر نتایج مربوط به عمق آبشستگی (Ds) و طول گودال آبشستگی (L_d) با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط Elnikhely and Fathy در ۴ دبی مختلف، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۰ متر مکعب بر ثانیه مقایسه شده است. منظور از پارامترهای بدون بعد نسبت عمق آبشستگی به عمق پایاب (Yt) یعنی Ds/Yt و نسبت طول گودال آبشستگی به عمق پایاب یعنی Ld/Yt استفاده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، حداکثر مقادیر نسبت‌های بدون بعد Ds/Yt و L_d/Yt روند نزولی دارند. چرا که با افزایش دبی، عمق پایاب افزایش می‌یابد. این تحقیق نشان داد که مدل عددی توانایی خوبی در شبیه‌سازی فرآیند انتقال رسوب و آبشستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی دارد. نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته و نرخ تغییرات گودال آبشستگی در پایین سرریز نزدیک به صفر می‌باشد. با افزایش دبی، حداکثر مقادیر عمق و طول گودال آبشستگی کاهش یافته است. بطور متوسط اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۵ درصد می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که تطابق خوبی بین نتایج حاکم است. شبیه‌سازی عددی پدیده‌های فیزیکی امکان بررسی دقیق‌تر میدان جریان، بردارهای سرعت و کانتورهای فشار را فراهم می‌کند که در این مقاله به آن نیز پرداخته شده است.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36964.2814

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

موضوع آبشستگی، هر چند که تاریخچه‌ای طولانی در علم هیدرولیک دارد، همچنان به دلیل شرایط خاص و پیچیدگی‌های آن و همچنین عدم وجود یک رابطه جامع که بتواند به تمامی شرایط پاسخ دهد، مورد توجه خاص محققان در حوزه علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه است. سازه‌های هیدرولیکی که به عنوان موانع در برابر جریان آب عمل می‌کنند، الگوی جریان را در نزدیکی خود تغییر داده و موجب بروز آبشستگی در این نواحی می‌شوند. اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی بیشتر نمایان می‌شود که عمق آبشستگی به حدی برسد که به پی سازه‌های رودخانه‌ای آسیب برساند و پایداری آن‌ها را تهدید کند یا حتی منجر به تخریب آن‌ها گردد. برای تعیین میزان عمق آبشستگی معمولاً از روابط تجربی یا مدل‌های فیزیکی استفاده می‌شود. با وجود اینکه مطالعات گسترده‌ای در زمینه برآورد آبشستگی موضعی اطراف سازه‌های هیدرولیکی مختلف انجام شده است، هنوز هیچ رابطه عمومی و جامعی برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی در اطراف هیچ یک از این سازه‌ها ارائه نشده است. همچنین باید توجه داشت که مبانی نظری و تجربی روش‌های مختلف

* پست الکترونیک نویسنده مسئول Amir.ghamatloo@znu.ac.ir
۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

استناد به این مقاله:
قامتلو، امیر و عباسی، سعید، "مدلسازی آبشستگی پایین دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D." مدل سازی در مهندسی، ۲۴ ۸۵ (۱۴۰۵): ۲۵۱-۲۶۴، doi: 10.22075/jme.2025.36964.2814

ممکن است متفاوت باشد. بنابراین، مقدار آبشستگی موضعی محاسبه شده با استفاده از روش‌های گوناگون ممکن است یکسان یا نزدیک به هم نباشد [۱].

۱-۲- بررسی تحقیقات پیشین

بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی، مکانیزم کنترل آبشستگی و پیش‌بینی هندسه آبشستگی در پایین دست یک سرریز پرداختند. متغیرهای آزمایشی سایز رسوبات، سختی ورقه و دبی جریان بودند. ایشان بیان نمود که آبشستگی در پایاب سرریز توسط جریان‌های بزرگ ثانویه و یک سیستم گردابی ایجاد شده به وسیله پرش هیدرولیکی کنترل می‌شود. سیستم جریان ثانویه چندین حفره آبشستگی در حال توسعه را ایجاد کرد که تعداد حفره‌ها به جنس بستر و دبی جریان بستگی داشت. با تغییر زبری ورقه محافظ آبشستگی تغییر چشمگیری در الگوهای جریان مشاهده نشد ولی حفره‌های آبشستگی، ۱۸ الی ۵۷ درصد کوچک‌تر از حفره‌هایی در حالت عدم وجود زبری در ورقه شدند. در این تحقیق تشابهی بین پروفیل‌های آبشستگی مشاهده نشد [۲]. در مطالعه‌ای، از یک مدل فیزیکی برای شبیه‌سازی اثر انحنای پایین‌دست سرریز و زاویه لبه انتهایی آن بر آبشستگی موضعی در پایین‌دست سرریز استفاده نمودند. سرریز با استفاده از چوب سخت ساج مدل‌سازی شد در حالی که از ماسه برای شبیه‌سازی بستر فرسایش پذیر استفاده شد. برای شبیه‌سازی کانال از فلوم شیشه‌ای با ارتفاع ۲۴/۹ سانتی‌متر و عرض ۸/۲ سانتی‌متر استفاده شد. انحنای پایین‌دست مدل سرریز با زاویه آستانه انتهایی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. اثرات پنج زاویه انتهایی مختلف بر روی آبشستگی محلی مورد آزمایش قرار گرفت. مقادیر زوایای آزمایش شده ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بود. کاهش حداکثر عمق آبشستگی در صورت تغییر زاویه آستانه انتهایی از ۱۰ درجه به ۶۰ درجه، ۱۸ درصد بود. مکان حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست در فاصله ۵ تا ۶ سانتی‌متری از لبه مدل سرریز پیدا شد. هنگامی که دبی ۳۲۰ درصد افزایش می‌یابد، آبشستگی بسیار سریع است و بستر فلوم برای مدل سرریز با زاویه آستانه ۶۰ درجه در عرض ۱۳ دقیقه در معرض دید قرار می‌گیرد و بستر فلوم پس از ۵/۲۵ دقیقه که زاویه به ۱۰ درجه تغییر می‌کند، در معرض دید قرار می‌گیرد. به طور کلی داده‌های جمع‌آوری‌شده از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مدل فیزیکی کاهش ۱۵ درصدی در عمق آبشستگی موضعی در پایین‌دست را نشان دادند که زاویه آستانه انتهایی از ۱۰ درجه به ۶۰ درجه تغییر کرد [۳].

نتایج یک بررسی تجربی در مورد عمق آبشستگی یک سکوی پرتابی که در پایین‌دست کف‌بند صلب قرار داده شده است نشان دادند که میانگین کاهش عمق آبشستگی با قراردادن سکوی پرتاب ۳۹ درصد بوده که حداکثر ۵۷/۳ درصد و حداقل ۱۶/۲ درصد است. عمق آبشستگی با کاهش طول کف‌بند افزایش یافته و با افزایش اندازه رسوب و باز شدن دریچه کاهش یافته است. عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود ذره افزایش یافته و تأثیر نوع رسوب بر عمق آبشستگی برای رسوبات غیریکنواخت، که به دلیل تشکیل لایه زرهی در حفره آبشستگی، عمق آبشستگی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد، مشهود است [۴]. اقدام به مدل‌سازی فیزیکی شیب شکن قائم نمودند تا آبشستگی پایین‌دست این سازه را مورد مطالعه قرار دهند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که عدد فرود دنسی‌متریک مؤثرترین پارامتر در عمق حفره آبشستگی بوده و افزایش اندازه ذرات رسوبی بستر و عمق پایاب منجر به کاهش ابعاد حفره آبشستگی می‌گردد [۵]. آزمایش‌های برای محاسبه آبشستگی موضعی در پایین‌دست یک سرریز اوجی با شیب‌های مختلف کف‌بند برای بررسی تأثیر آن بر ویژگی‌های آبشستگی انجام دادند. مدل‌های فیزیکی توسعه‌یافته برای سرریز و کف‌بند به داخل آب در کانال نصب می‌شوند که تحت جریان زیربحرانی و شرایط آب شفاف با استفاده از بستر یکنواخت بدون چسبندگی (خاک) به عنوان مواد بستر با اندازه دانه متوسط (d50=0.65 میلی‌متر) انجام شد. از چهار زاویه کف‌بند (۰، ۲/۷۳، ۵/۱۹ و ۷/۴۳ درجه) برای نشان دادن تأثیر شیب کف‌بند بر آبشستگی محلی استفاده شد. نتایج نشان داد که شیب کف‌بند یکی از پارامترهای مهم برای کاهش عمق آبشستگی موضعی و وسعت حفره آبشستگی است. نتایج تأثیر شیب برای زاویه کف‌بند کاهشی در حدود (۵۳، ۴۶ و ۳۵) درصدی در حداکثر عمق آبشستگی و حدود (۳۳، ۴۹ و ۳۳) درصدی در حداکثر طول آبشستگی در مقایسه با کف‌بند افقی به ترتیب برای زاویه‌ها (۲/۷۳، ۵/۱۹ و ۷/۴۳) نشان داد [۶]. (Epely-Chauvin et al. 2014) به بررسی عددی آبشستگی حوضچه استغراق با استفاده از نرم افزار FLOW-3D پرداختند. آنها یک بستر رسوبی یکنواخت با

قطر متوسط ذرات ۱/۱۵ میلی‌متر، قطر نازل جت ۳۵ و ۲۱/۷ میلی متر، زاویه قرارگیری نازل جت ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و همچنین سه دبی ۱/۵، ۲/۱ و ۳/۵ لیتر در ثانیه را برای مدل‌سازی در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که تطابق و همپوشانی مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی برقرار است، به گونه‌ای که ضریب تبیین بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی برابر ۰/۹ بود. همچنین، نتایج نشان داد که زاویه برخورد جت به عنوان یک پارامتر کلیدی برای رسیدن به شرایط پایدار عمق آبشستگی است [۷].

تأثیر زاویه پرش اسکی پرتابه بر حفره آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی همگرا را بررسی نمودند. تأثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد اصلی آبشستگی، برای شرایط مختلف جریان شامل دبی جریان، عمق پایاب و زاویه پرش اسکی پرتابه مورد بررسی قرار گرفت. پروفیل‌های طولی آبشستگی برای هر آزمایش اندازه‌گیری شد و نتایج با پیش‌بینی تجربی پژوهشگران قبلی مقایسه شد. نتایج نشان داد که اختلاف کمی نتایج تحقیق با نتایج محققین قبلی دارد و این اختلاف در حدود ۱۲ درصد است. با توجه به تجزیه و تحلیل اثر زاویه پرتابه، یعنی برای $\alpha =20$ و $\alpha=25$ درجه نیز به این نتیجه رسیدند که برای زاویه ۲۵ درجه، حداکثر عمق آبشستگی در نزدیکی پرتابه رخ می‌دهد. این نتیجه ممکن است با اتلاف انرژی در طول مسیر جت توضیح داده شود که انرژی را در لحظه ضربه کاهش می‌دهد [۸].

تأثیر نصب کف‌بند در پایین‌دست سرریز پلکانی با و بدون آب‌پایه کنگره‌ای با شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳ بر تغییرات عمق آبشستگی در پایین‌دست آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف دبی، هندسه آب‌پایه‌ها و طول‌کف‌بند صورت پذیرفت. تجزیه و تحلیل نتایج آن‌ها نشان داد که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ و در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر با افزایش طول کف‌بند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط بدون آب‌پایه به ترتیب به میزان ۲۳ و ۳۴ درصد کاهش یافته است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که با نصب آب‌پایه، در بهترین عملکرد آن، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر به طور متوسط ۵۰ درصد نسبت به شرایط بدون آب‌پایه کم شد. با تغییر شیب کارگذاری پلکان‌های سرریز به ۱:۳، افزایش طول کف‌بند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر و برای شرایط بدون آب‌پایه به ترتیب به میزان ۳۶ و ۴۳ درصد کاهش داده و با نصب آب‌پایه بر روی پلکان‌های سرریز، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی به طور متوسط ۵۲ درصد نسبت به شرایط بدون آب‌پایه کم شد [۹].

الگوهای جریان و آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانوی مستطیلی نوع A (PKWs) به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. تغییرات توپوگرافی بستر در پایین‌دست PKW با اشکال مختلف تاج سرریز، به عنوان مثال، یک تاج استاندارد و یک تاج با دندانه (فرورفتگی) در هندسه های مختلف، از جمله تاج‌های مثلثی، نیم‌دایره، سینوسی و مستطیلی و زیگزاگی بررسی شد. مدل عددی سه بعدی نتایج نشان داد که مدل Flow-3D جریان و آبشستگی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده است. دندانه‌های تاج جانبی به طور قابل ملاحظه ای بر ویژگی‌های هندسی حفره آبشستگی، از جمله عمق آبشستگی پنجه سرریز، حداکثر عمق آبشستگی، سطح حفره آبشستگی و حجم حفره آبشستگی تأثیر گذاشت. کمترین مقدار حداکثر عمق آبشستگی مربوط تاج سرریز با دندانه‌های مثلثی بود. در این حالت کاهش ۱۰/۵ و ۱۷ درصدی مولفه‌های طولی و عمودی سرعت جریان در سطح تاج سرریز و در زیر آن باعث کاهش ۳۸ درصدی آبشستگی موضعی شد. انرژی جریان بیشتر در سرریز با دندانه‌های مستطیلی باعث می‌شود که محل حداکثر عمق آبشستگی در فاصله دورتری از پنجه سرریز رخ دهد. کمترین شیب های بالادست و پایین‌دست حفره آبشستگی در مدل‌هایی با تاج دندانه (فرورفتگی) مستطیلی و تاج جانبی زیگزاگی مشاهده شد [۱۰]. مجموعه‌ای از آزمایشات در آزمایشگاه توسط برای بررسی آبشستگی پایین‌دست پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی سرریز پلکانی انجام دادند. آزمایش‌ها تحت دبی‌های مختلف جریان ، عمق‌های پایاب و اندازه‌های رسوب انجام شد. طراحی بهینه پارامترها از جمله؛ نوع، شیب شوت، ارتفاع پله و نوع سرریز پلکانی جریان با توجه به دلایل و معیارهای اقتصادی که منجر به اتلاف بیشتر انرژی می‌شود، انجام شده است. به طور کلی، با افزایش اندازه رسوب و عمق پایاب یا کاهش عدد فرود ذرات و عمق بحرانی، ابعاد آبشستگی کاهش یافت. با کاهش عدد فرود ذرات، عمق نسبی آبشستگی، فاصله نسبی حداکثر عمق آبشستگی و طول نسبی آبشستگی به ترتیب ۶۸/۶، ۷۵/۶ و ۷۳/۴ درصد کاهش یافت. همچنین معادلات تجربی تحلیل

رگرسیون برای برآورد پارامترهای آبشستگی ارائه شد [۱۱]. آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نوع A در جریان آزاد و مستغرق، بصورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی نمودند. برای انجام آزمایش‌ها از فلومی به طول ۱۰، عرض ۰/۷۵ و ارتفاع ۰/۸ متر استفاده شد. آزمایش‌ها با دبی‌های بین ۳۰ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه، عدد فرود ذره بین ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۵۸، عمق پایاب ۰/۱۳ متر برای جریان آزاد و ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر برای جریان مستغرق انجام شد. جنس بستر در پایین‌دست سرریز، ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت، قطر میانگین ۲/۲ میلی‌متر و به ضخامت ۰/۴۲۵ متر و طول ۲ متر بود. نتایج نشان داد در جریان آزاد تغییرات بستر نسبت به جریان مستغرق با سرعت بیشتری انجام می‌شود، و عمق و طول حفره‌ی آبشستگی بیشتر است. عمق آبشستگی نسبی با افزایش ۷۷ درصدی عمق پایاب برای اعداد فرود ذره ۰/۰۲۹، ۰/۰۳۷، ۰/۰۴۵، ۰/۰۵۲ و ۰/۰۵۸، به ترتیب ۴۲، ۴۵، ۲۱، ۲۸ و ۲۷ درصد و با افزایش ۱۲۳ درصدی عمق پایاب، به ترتیب ۹۵، ۹۲، ۹۰، ۷۵ و ۶۸ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش ۱۸ درصدی نسبت استغراق در عدد فرود ذره ۰/۰۲۹، و افزایش ۹۶ درصدی نسبت استغراق در عدد فرود ذره ۰/۰۵۸، بیشینه عمق آبشستگی نسبی به ترتیب ۹۲ و ۵۶ درصد کاهش می‌یابد. محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی در عمق پایاب ۰/۱۳، ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر به ترتیب در فاصله‌ی ۰/۱۸ الی ۰/۳۰، ۰/۱۸ الی ۰/۳۶ و ۰/۰۳ الی ۰/۳۰ متری از پنجه‌ی سرریز، ایجاد شده است. با افزایش عدد فرود ذره، طول نسبی حفره‌ی آبشستگی افزایش یافته است [۱۲]. اثر اندازه دانه ذرات بر عملکرد هیدرولیکی و تأثیر آن بر آبشستگی سرریز پلکانی گابیونی را بررسی نمودند تا طیف وسیعی از قطرهای موجود را برای استفاده در ساخت و ساز در اختیار طراحان قرار دهند. برای این منظور، شش مدل تجربی از سرریز پلکانی گابیونی مورد آزمایش قرار گرفت. مدل سرریز گابیون پلکانی کارکرده دارای ۵ پله با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است که پله‌ها هر کدام ۷ سانتی‌متر افقی و ۴ سانتی‌متر عمودی می‌باشد. مدل‌های گابیون با قطر ذرات مختلف (۵، ۱۰، ۱۴، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر) و مدل سرریز صلب مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین شش مدل اضافی از دو ترکیب مخلوط آزمایش شده است، اولی با قطر ذرات ۱۰ میلی متر و ۳۰ میلی متر، دیگری با قطر ۵ میلی متر و ۲۰ میلی متر، آنها در سه نسبت حجمی مختلف (۱:۱، ۱:۲، ۱:۳)، قطر معادل برای هر مخلوط محاسبه شد. نتایج نشان داد که افزایش قطر نسبی در مدل‌های تک سایز و مختلط باعث افزایش اتلاف انرژی و کاهش آبشستگی می‌شود. مدل با قطر نسبی ۰/۱۵ بهترین نتایج را داد. این مدل باعث کاهش Y2/Yup، DS/Yup به ترتیب حدود ۹/۹۶ و ۴۰/۱۹ درصد و افزایش ΔE/Eup به میزان ۱۱/۷ درصد نسبت به مدل گابیون صلب می‌شود [۱۳].

۱-۳- معادله بقای جرم یا پیوستگی

این معادله از قانون بقای جرم و با نوشتن معادلهٔ تعادل برای هر یک از المان‌های سیال بدست می‌آید در حالت کلی معادلهٔ پیوستگی بصورت زیر نوشته می‌شود [۱۴].

$$\frac{\partial}{\partial x} = (\mathrm{u}A_X) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathrm{u}A_y) + \frac{\partial}{\partial Z}(\mathrm{u}A_Z) = 0 \quad (۱)$$

که در این معادله $(A_x, A_y, A_z), (u, v, w)$ به ترتیب مقادیر سرعت و نسبت مساحت در راستای $(\mathrm{x}, \mathrm{y}, z)$ می‌باشند.

۱-۴- معادلهٔ مومنتوم یا حرکت

معادلات مومنتوم از حل معادلات ناویر استوکس به دست می‌آید. معادله ناویر استوکس به وسیله زیر بیان می‌شود[۱۴].

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left[UA_x\frac{\partial u}{\partial x} + VA_y\frac{\partial u}{\partial y} + WA_Z\frac{\partial u}{\partial Z}\right] = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left[UA_x\frac{\partial v}{\partial x} + VA_y\frac{\partial v}{\partial y} + WA_Z\frac{\partial v}{\partial Z}\right] = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) \quad (۳)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left[UA_x\frac{\partial w}{\partial x} + VA_y\frac{\partial w}{\partial y} + WA_x\frac{\partial w}{\partial Z}\right] = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) + g_z \quad (۴)$$

در روابط V_f کسر حجمی سیال، ρدانسیته سیال، P فشار و g_z شتاب ثقل وارد بر جریان می‌باشد.

۱-۵- معادلهٔ پروفیل سطح آزاد سیال

پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال یعنی $F(\mathrm{x}, \mathrm{y}, z)$ محاسبه می‌شود. همچنین این تابع قادر به نشان دادن مقادیر حجم سیال در همه سلول‌های

محاسباتی می‌باشد که به وسیله معادلهٔ زیر نشان داده می‌شود [۱۵]:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_XU)+\frac{\partial}{\partial y}(FA_yv)+\frac{\partial}{\partial z}(FA_zw)\right]=0 \quad (۵)$$

در این معادله F تابع نسبت حجم سیال می‌باشد که مقادیری بین (۰،۱) می‌باشد و A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های (x, y, z) است.

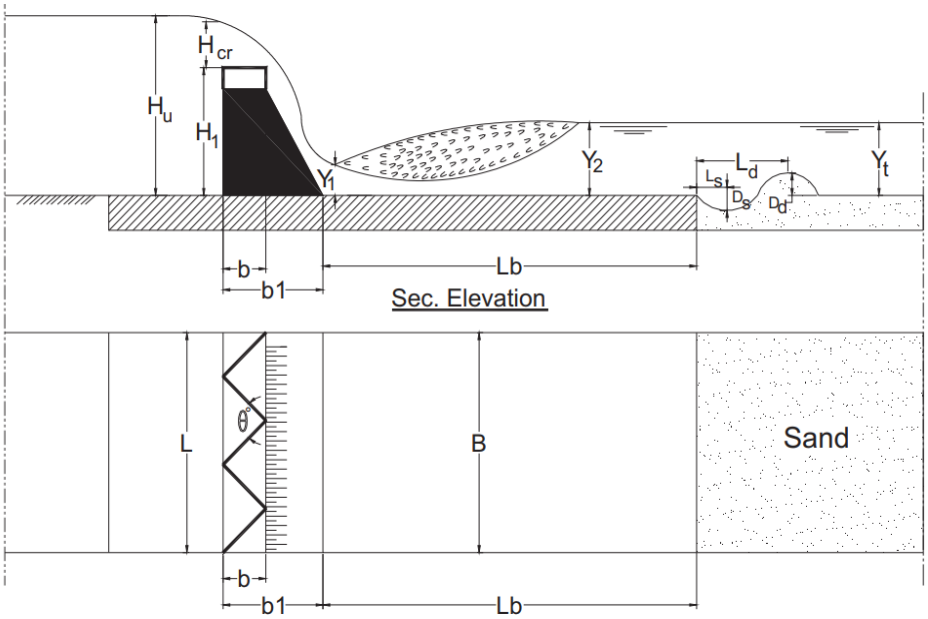
۱-۶- مدل فرسایش در مدل‌سازی آبشستگی

مدل فرسایش[2]در نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی انتقال، فرسایش و ته نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات (قابل تعریف برای کلیه مصالح با مشخصات فیزیکی خاص) در اثر جریان سیال می‌باشد. این مدل از دو میدان غلظت بار معلق و بار بستر استفاده می‌کند. جابجایی و بلند شدن رسوبات معلق با سیال در اثر تغییر گرادیان فشار محلی است. این رسوبات معلق ممکن است ناشی از جریان ورودی حاوی ذرات معلق و یا فرسایش بستر ایجاد شوند. رسوبات بستر توسط ذرات مجاور محدود و لذا براحتی جابجا نشده و فقط در صورتیکه بصورت فرسایش یافته در سطح مشترک بستر و سیال به بار معلق تبدیل شوند، حرکت می‌کنند. بار معلق در صورتی به بار بستر تبدیل می‌شود که سرعت ته‌نشینی بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد [۱۶].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل خاکریز در تحقیق حاضر

مدل سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل به کار رفته در تحقیق حاضر از مطالعات آزمایشگاهی [۱۷]، انتخاب شده است. آزمایشات در یک کانالی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵/۷۰ متر، ۰/۳۰ متر و ۰/۵۸ متر انجام شد. سرریز کنگره‌ای با زاویه راس (θ) ۶۰ درجه بر روی یک بند ذوزنقه‌ای شکل با طول تاج (b) ۰/۱۳۴ متر، ارتفاع (H1) ۰/۳۰ متر و سطح شیبدار ۱:۱ (افقی: قائم) و هم عرض کانال (B) قرار دارد. پایین دست سرریز کنگره‌ای و بعد از یک حوضچه آرامش ساده به طول (Lb) ۱/۲۰ متر، یک باکس رسوبی با ذرات رسوبی ماسه‌ای با قطر متوسط ۰/۷۵ میلی‌متر به ضخامت ۰/۰۵ متر و طول ۱ متر با وزن مخصوص ۲/۶۵ پر شده است. مشخصات سرریز کنگره‌ای و شماتیکی از کانال آزمایشگاهی Elnikhely and Fathy در شکل (۱) ارائه شده است. همچنین در جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای مثلثی ارائه شده است. در این جدول LT طول کل تاج سرریز کنگره‌ای، b طول تاج بند ذوزنقه‌ای و b1 طول پاشنه بند ذوزنقه‌ای می‌باشد.



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی و مشخصات سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل در آزمایشات [۱۷]

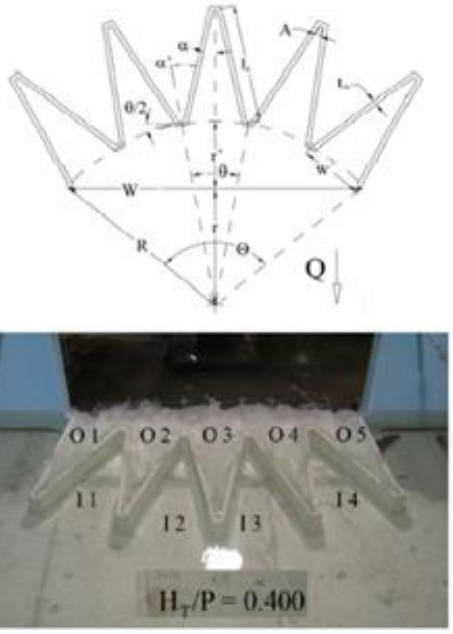
[2] Sediment Scour

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از مدل سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل

Q (m^3/s)	Yt (m)	θ (°)	L_T (m)	b (m)	b_1 (m)
0/007	0/085	60	0/60	0/134	0/30
0/008	0/096	60	0/60	0/134	0/30
0/009	0/109	60	0/60	0/134	0/30
0/010	0/120	60	0/60	0/134	0/30

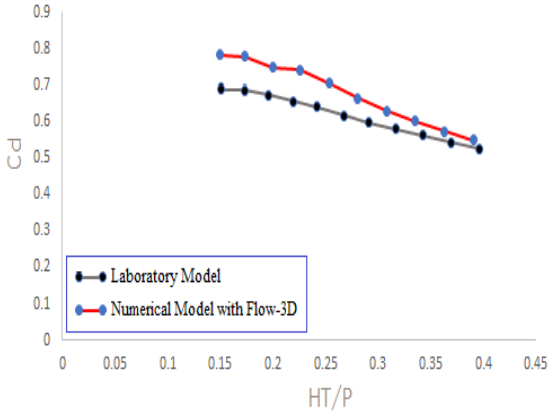
۲-۲- صحت‌سنجی

این مدلسازی داده‌ها اندازه گیری دبی و ضریب دبی در شرایط استفاده از ۵ دهانه به ارتفاع حدودا" ۲۲متر و طول سرریز ۸ متر (شکل۲) و برگرفته از پایان نامه آقای بریان مارک[3] [۱۸] در دانشگاه یوتا[4] استفاده شده است. در شکل (۳) نحوه مش بندی مربوط به مدل انتخاب شده در مدلسازی عددی و مدت زمان آن۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این تحلیل و مدلسازی داده‌های آزمایشگاهی با مدل عددی (شکل ۴) مقایسه شد است، مشاهده می‌شود. تاریخچه زمانی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نزدیک به هم می باشد. در مدل طراحی شده در این مدلسازی فقط یک مدل از بین مدل‌های صورت گرفته در پایان نامه آقای بریان مارک می‌باشد.



شکل ۲- مدل استفاده شده در پایان نامه [۱۸].

شکل ۳ . مدل مش بندی استفاده شده در مدلسازی عددی



شکل۴- نتایج تاریخچه زمانی مربوط به مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

۲-۳- شرایط مرزی اعمال شده در مدل

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی‌های عددی مش‌بندی و تعیین ابعاد مش‌های انتخابی جهت یافتن بهینه‌ترین مدل در قیاس با نتایج واقعی است. شبکه بندی و ابعاد سلول می‌توانند دقت نتایج و زمان شبیه سازی را تحت تأثیر قرار دهند و لذا از این جهت، تعیین حداقل تعداد سلول‌ها به گونه‌ای که دارای دقت کافی در زمینه هندسه مدل و همچنین جزئیات جریان باشند، امری ضروری به نظر می‌رسد. هرچه ابعاد شبکه ریزتر باشد، می‌توان به دقت

[3] Brian Mark

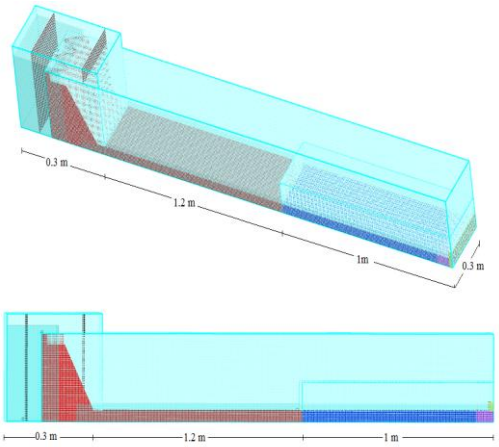
[4] Utah state university

بهتری دست یافت، اما ممکن است مدت زمان اجرا و یا قدرت سیستم پردازشگر جواب ندهد. همچنین زمانی که مدل‌سازی برای انتقال رسوب و فرآیند آبشستگی هست، طبق توصیه مانیتورینگ نرم‌افزار، اندازه رسوبات نبایستی از ده درصد اندازه مش بزرگتر باشد. در برخی موارد رعایت نکردن این موضوع باعث توقف شبیه‌سازی می‌شود. برای مدل خاکریز و باکس رسوبی در پایین دست آن، با شبیه سازی مدل در سه حالت مختلف با اندازه‌ی مش‌های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آن‌ها از روی داده‌های آزمایشگاهی در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد.

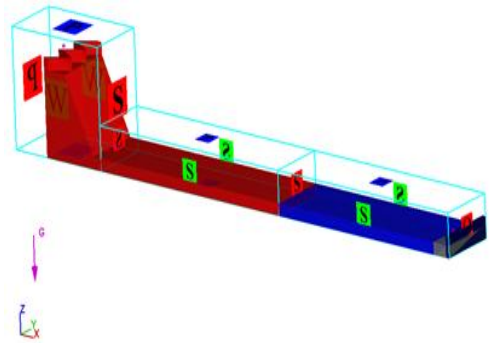
جدول ۲- مشخصات سایز مش انتخاب شده برای آنالیز

سایز مش بلاک اول (متر)	سایز مش بلاک دوم (متر)	سایز مش سوم (متر)	تعداد مش	مش
۰/۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۲۸۸۶۶۴	ریز

شکل (۵) شبکه بندی نهایی ایجاد شده برای دامنه حل و شکل (۶) شرایط مرزی اعمال شده را در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



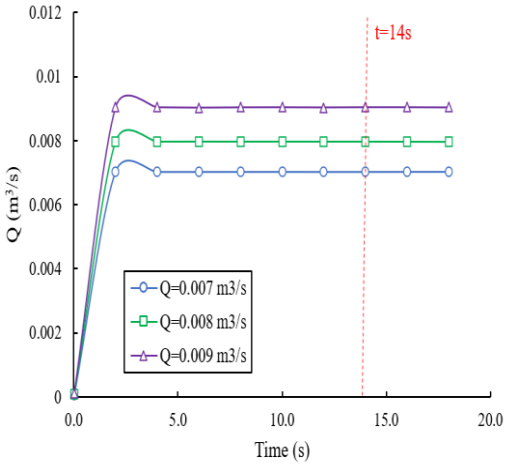
شکل۵- مدل المان محدود، بالادست و پایین دست کانال



شکل۶- شرایط مرزی اعمال شده در مدل

۳- نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی

شکل (۷) نمودارهای تاریخچه زمان بدست آمده از Flux surface مربوط به دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل بدست آمده از نتایج عددی را نشان می‌دهد.



شکل۷- نتایج تاریخچه زمانی مربوط به دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای در دبی‌های مختلف

مشاهده می‌شود که از زمان ۱۴ ثانیه به بعد تقریبا تغییرات نتایج دبی نسبت به زمان، ناچیز است و جریان به پایداری نسبی رسیده است. همچنین در این بازه زمانی نرخ تغییرات گودال آبشستگی در پایین سرریز تقریبا نزدیک به صفر بود. در شکل (۸) تغییرات Ds/Yt و Ld/Yt را به ازای Q حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در این نمودار مشخص هست که نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بوده و نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی فرآیند انتقال رسوب و آبشستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل می‌باشد. تغییرات حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی در نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش دبی، حداکثر مقادیر نسبت‌های بدون بعد Ds/Yt و Ld/Yt روند نزولی دارند. چرا که با افزایش دبی، عمق پایاب افزایش یافته و مقادیر Ds/Yt و Ld/Yt کاهش می‌یابد. یکی از راه‌های تعیین محدوده‌ی درصد خطا بین داده‌های حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D با داده‌های آزمایشگاهی استفاده از رابطه‌ی (۵) جهت تعیین درصد خطای مطلق نسبی (MAPE) می‌باشد.

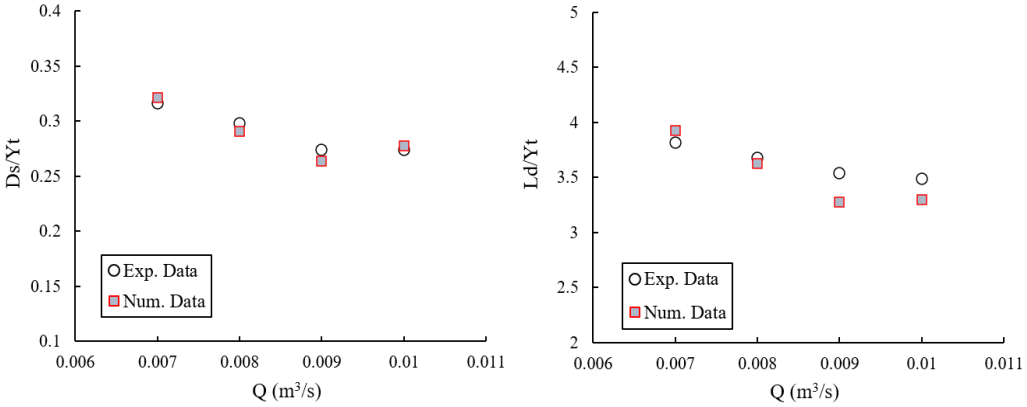
$$\text{MAPE}(\%) = \left|\frac{(M)_{EXp} - M_{NUM}}{(M)_{EXP}}\right| * 100 \qquad (۵)$$

در رابطه‌ی فوق MAPE نشانگر درصد خطای مطلق نسبی، (M)EXP پارامتر هیدرولیکی حاصل از نتایج آزمایشگاهی

و (M)NUM پارامتر هیدرولیکی حاصل از حل عددی می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر Ds/Yt و Ld/Yt حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی را برای مدل سرریز کنگره‌ای در دبی‌های مختلف همراه با مقادیر خطای آن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بطور متوسط اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۵ درصد می‌باشد، و می‌توان نتیجه گرفت که تطابق خوبی بین نتایج حاکم است.

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب پروفیل گودال آبشستگی و کانتور مقدار آبشستگی ایجاد شده در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل را به ازای دبی‌های مختلف نشان می دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، حداکثر عمق آبشستگی و طول گودال آبشستگی افزایش می‌یابد.

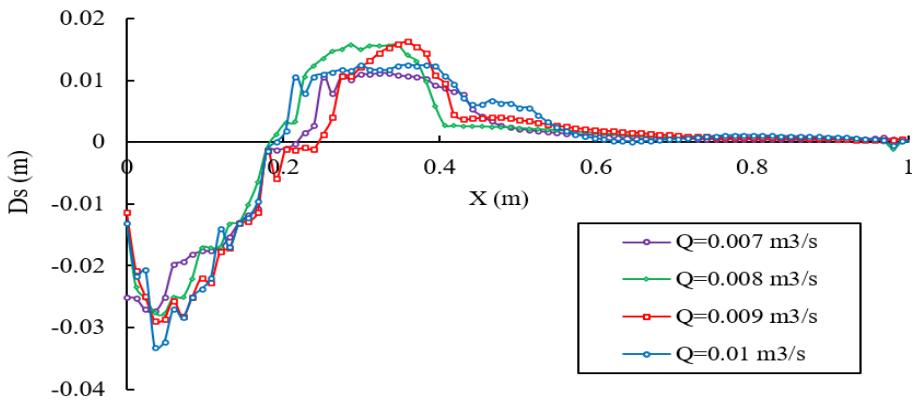
شکل‌های (۱۱)، (۱۲) به ترتیب بردار سرعت و کانتور فشار ایجاد شده در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل را به ازای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد.



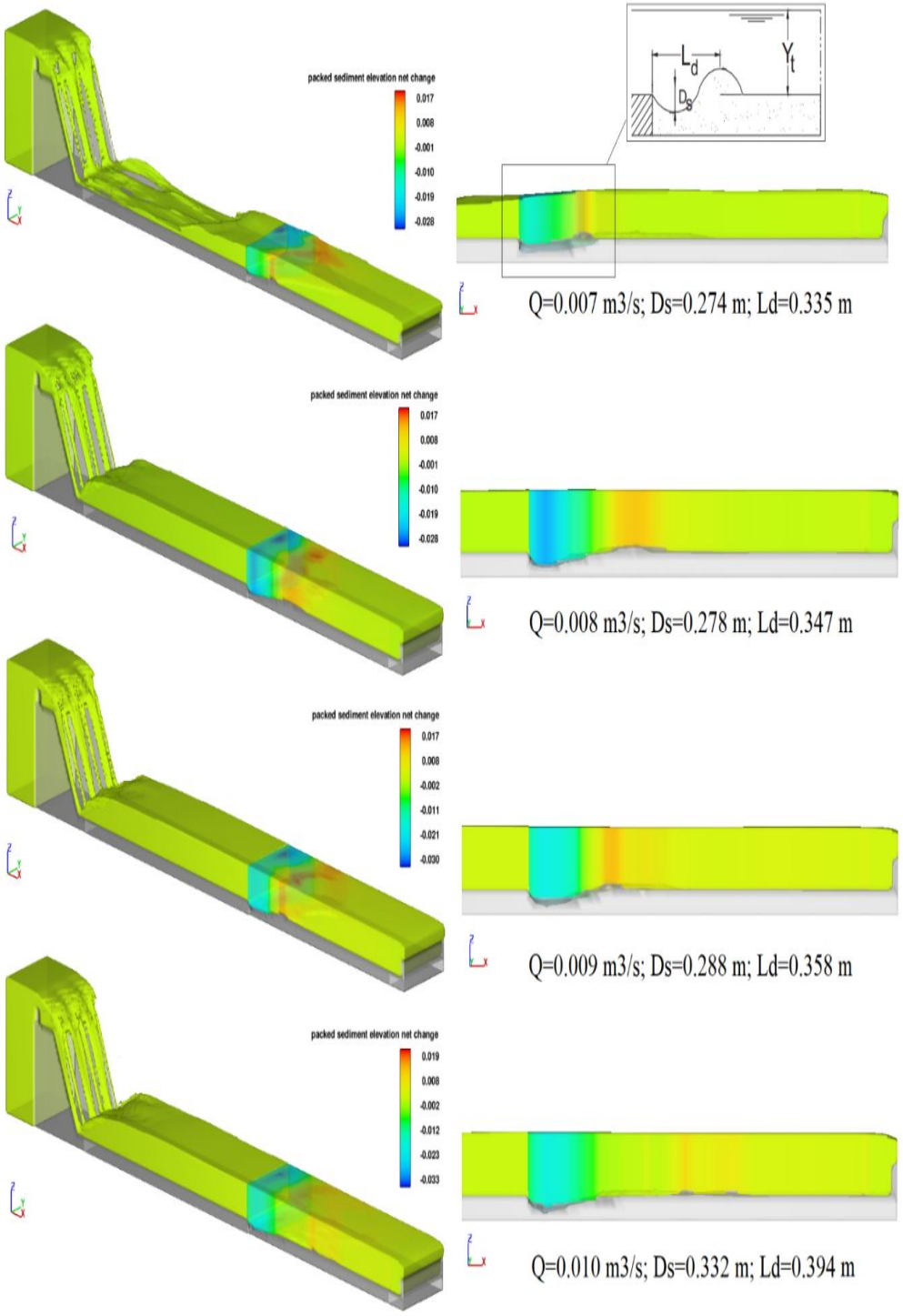
شکل ۸- تغییرات Ds/Yt و Ld/Yt را به ازای Q حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

جدول ۳- درصد خطای بدست آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی

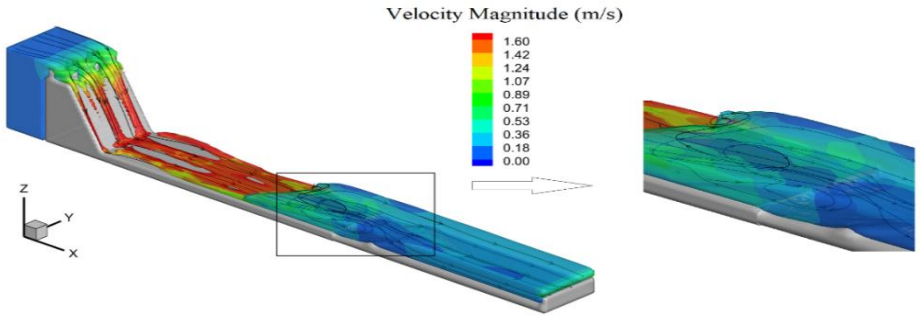
MAPE_ Ld/Yt	MAPE_ Ds/Yt	مقادیر عددی تحقیق حاضر		مقادیر آزمایشگاهی Elnikhely and Fathy (2020)		Yt (m)	Q (m3/s)
		Ld/Yt	Ds/Yt	Ld/Yt	Ds/Yt		
۲/۹۳	۱/۴۹	۳/۹۲۶	۰/۳۲۱	۳/۸۱۴	۰/۳۱۷	۰/۰۸۵	۰/۰۰۷
۱/۴۲	۲/۳۲	۳/۶۲۲	۰/۲۹۱	۳/۶۷۴	۰/۲۹۸	۰/۰۹۶	۰/۰۰۸
۷/۲۹	۳/۶۹	۳/۲۷۷	۰/۲۶۴	۳/۵۳۵	۰/۲۷۴	۰/۱۰۹	۰/۰۰۹
۵/۴۸	۱/۳۹	۲/۲۹۷	۰/۲۷۸	۳/۴۸۸	۰/۲۷۴	۰/۱۲۰	۰/۰۱۰
۴/۲۸	۲/۲۲	میانگین درصد خطا					



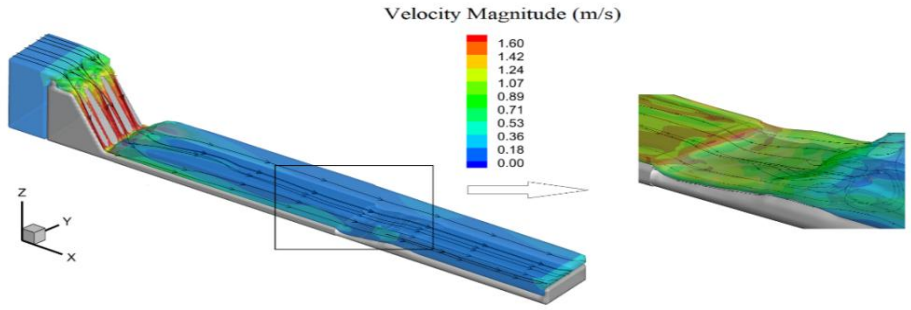
شکل ۹- پروفیل آبشستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل به ازای دبی‌های مختلف



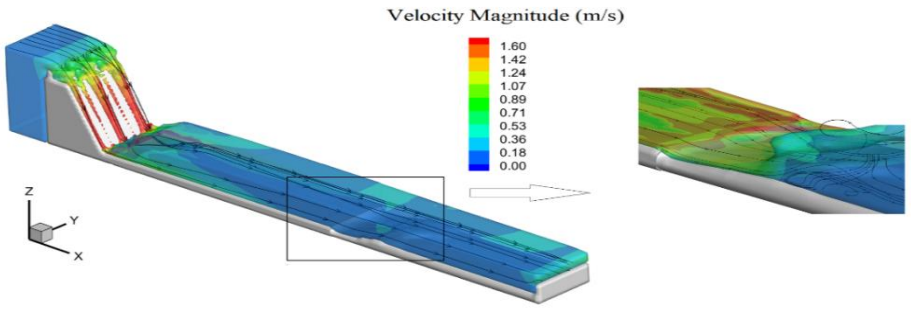
شکل ۱۰- گودال آبشستگی ایجاد شده در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای در دبی‌های مختلف



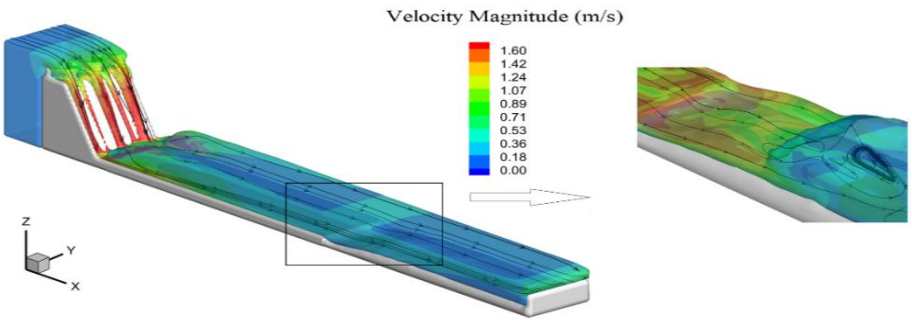
Q=0.007 m3/s; Ds=0.274m; Ld=0.335m



Q=0.008 m3/s; Ds=0.278m; Ld=0.347 m

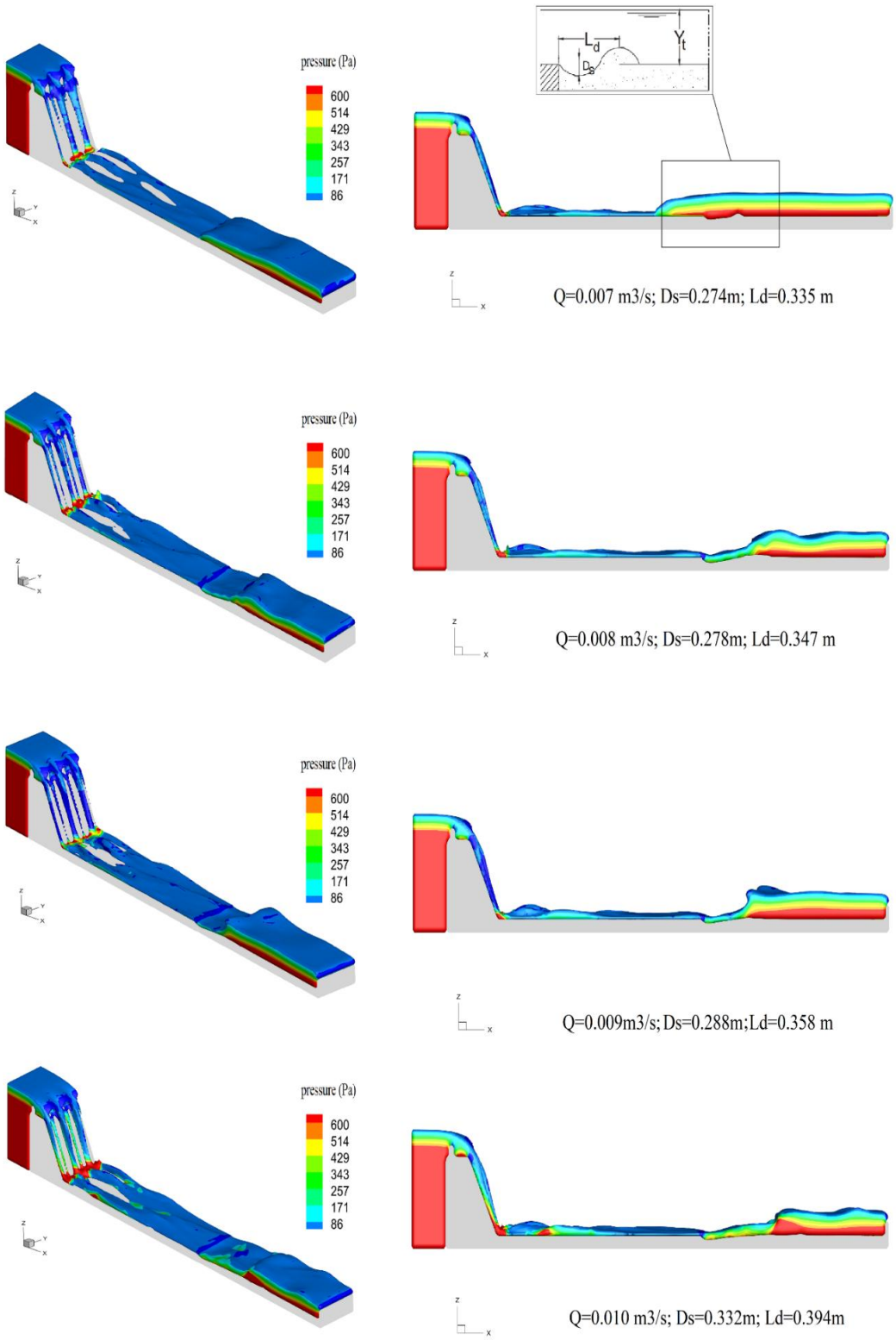


Q=0.009m3/s; Ds=0.288m;Ld=0.358 m



Q=0.010 m3/s; Ds=0.332m; Ld=0.394m

شکل ۱۱- بردار سرعت ایجاد شده در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای در دبی‌های مختلف



شکل ۱۲- فشار ایجاد شده در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای در دبی‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل آزمایشگاهی انجام شده [۱۷] تحت شرایط مختلف با ۴ دبی، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۰ متر مکعب بر ثانیه به صورت عددی مورد مدلسازی انجام گرفته شد. برای مقایسه بهتر از پارامترهای بدون بعد نسبت عمق آبشستگی به عمق پایاب (Yt) یعنی Ds/Yt و نسبت طول گودال آبشستگی به عمق پایاب یعنی Ld/Yt استفاده شد. همچنین در این بازه زمانی نرخ تغییرات گودال

آبشستگی در پایین سرریز تقریبا نزدیک به صفر بوده است. در شکل (۸) تغییرات Ds/Yt و Ld/Yt را به ازای Q حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در نمودار و شکل‌ها مشخص هست، که نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی تقریباً یکسان بوده و نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی فرآیند انتقال رسوب و آبشستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل می‌باشد. تغییرات حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی در نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش دبی، حداکثر مقادیر نسبت‌های بدون بعد Ds/Yt و Ld/Yt روند نزولی دارند. چرا که با افزایش دبی، عمق پایاب افزایش یافته و مقادیر Ds/Yt و Ld/Yt کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر سعید عباسی تقدیر و تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت های نویسندگان

امیر قامتلو: نگارش و مدلسازی مقاله

سعید عباسی: ویرایش تخصصی

منابع مالی

این مقاله برگرفته از کار آزمایشگاهی آقای Elnikhely and Fathy (2020) انتخاب شده است.

مراجع

[1] Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision. 2011. Guide to Methods for Calculating Local Scour. Publication 549.

[2] Dargahi, Bijan. "Scour development downstream of a spillway." Journal of hydraulic research 41, no. 4 (2003): 417-426.

[3] Mohammed, T. A., M. M. M. Noor, B. K. Huat, A. H. Ghazali, and T. S. Yunis. "Effect of curvature and end sill angle on local scouring at downstream of a spillway." International Journal of Engineering and Technology 1, no. 1 (2004): 96-101.

[4] Dey, Subhasish, and Arindam Sarkar. "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets." Journal of hydraulic engineering 132, no. 3 (2006): 246-257.

[5] Dey, Subhasish, and Rajkumar V. Raikar. "Scour below a high vertical drop." Journal of Hydraulic Engineering 133, no. 5 (2007): 564-568.

[6] Alwan, Husam Hadi, Hayder HH Kamonna, and Noor Alaa Hashim. "Evaluation of local scour development downstream an apron of different angles for an ogee spillway." Kufa Journal of Engineering 7, no. 3 (2016): 1-12.

[7] Epely-Chauvin, G., G. De Cesare, and S. Schwindt. “Numerical Modelling of Plunge Pool Scour Evolution in Non-Cohesive Sediments.” Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 8, no. 4 (2014): 477–87.

[8] Sá Machado, L., M. M. C. L. Lima, R. Aleixo, and E. Carvalho. “Effect of the Ski Jump Bucket Angle on the Scour Hole Downstream of a Converging Stepped Spillway.” International Journal of River Basin Management 18, no. 3 (2020): 383–94.

[9] Yousefzadeh Podeh, F., M. Esmaeili Varaki, B. Shafiei Sabet, and S. Sahameddin Mahmoudi Kurdistani. “Experimental Study of the Effect of the Apron Installation on Reducing Scour Depth at the Downstream of Stepped Weirs with Labyrinth Sill.” Journal of Hydraulics 18, no. 1 (2023): 65–81. (in Persian).

[10] Abdi Chooplou, C., M. Ghodsian, D. Abediakbar, and A. Ghafouri. “An Experimental and Numerical Study on the Flow Field and Scour Downstream of Rectangular Piano Key Weirs with Crest Indentations.” Innovative Infrastructure Solutions 8, no. 5 (2023): 140.

[11] Dah-Mardeh, Arman, Gholamreza Azizyan, Mahmood Shafai Bejestan, Abbas Parsaie, and Seyed Hossein Rajaei. "Laboratory investigation of scour downstream of the Stepped spillway." (2023).

[12] Badaghi, Elnaz, Massoud Qudsian, and Chenour Abdi. “Investigation and Experimental Evaluation of Scour Downstream of A-Type Trapezoidal Key Overflow in Free and Submerged Flow.” Hydraulic Journal 18, no. 1 (2023): 1–18.

[13] Elghandour, E. H., A. A. Habib, M. R. Fahmy, and E. Eltohamy. “Investigation of Hydraulic Characteristics Downstream of Gabion Dams.” The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology, (2023)

[14] Yakhot, V., S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale. “Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique.” Physics of Fluids 4, no. 7 (1992): 1510–20.

[15] Ghasem Zadeh, F. Simulation of Hydraulic Problems in FLOW-3D. Tehran: Naavar Publications, 2015. (in Persian).

[16] Hedayatifar, M., and M. Pourlak. Fluid Dynamics Simulation with FLOW-3D. Tehran: Ati Nagar Publications, 2014. (in Persian).

[17] Elnikhely, Eman Aly, and Ismail Fathy. "Prediction of scour downstream of triangular labyrinth weirs." Alexandria Engineering Journal 59, no. 2 (2020): 1037-1047.

[18] Crookston, Brian Mark. “Labyrinth Weirs.” PhD diss., Utah State University, 2010.