



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modeling Scour Downstream of a Levee Using Flow-3D

Amir Ghamatloo^{a,*}, Saeed Abbasi^a

^a Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-04-25

Revised: 2025-06-04

Accepted: 2025-06-21

Keywords:

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

ABSTRACT

In this paper, the results of numerical modeling of water flow over a dam and the depth and length of the downstream scour hole are compared with the experimental results of Muhammad Abbas and Tanaka under different hydraulic conditions including two critical depths on the spillway crest (D_c) equal to 0.03 and 0.04 m and two downstream depths (D_p) of 0.07 and 0.09 m. For this purpose, the dimensionless parameters of the flow depths on the crest and downstream, namely $D_c^* = D_c/HE$ and $D_p^* = D_p/HE$, have been used. Also, the dimensionless parameters $S_d^* = S_d/HT$ and $L_s^* = L_s/HT$ have been used for the scour depth and scour hole length. With increasing the dimensionless downstream depth (D_p^*), it was observed that with increasing D_c^* and correspondingly the critical flow depth on the spillway crest, the maximum depth and length of the scour hole increase, but with increasing the dimensionless critical depth D_c^* , these values decrease. On average, the difference between the numerical and experimental results is less than 3/75%. 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.2025.37534.2842>

© 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:

A. Ghamatloo and S. Abbasi, "Modeling scour downstream of a levee using Flow-3D," Journal of Modeling in Engineering, 24 84 (2026): 153-167, doi: 10.22075/jme.2025.37534.2842

مدلسازی آبستگي پايين دست يك بند با استفاده از Flow-3D

امير قاملو^{۱*}، سعید عباسی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱	در مقاله حاضر نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی عبور آب از روی یک بند و عمق و طول حفرة آبستگي پايين دست آن با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط Muhammad Abbas and Tanaka تحت شرایط هیدرولیکی مختلف شامل دو عمق بحرانی روی تاج سرریز (Dc) برابر ۰/۰۳ و ۰/۰۴ متر و دو عمق پایاب (Dp) ۰/۰۷ و ۰/۰۹ متر مقایسه شده است. برای این منظور از پارامترهای بدون بعد اعماق جریان روی تاج و پایاب یعنی $Dc^*=Dc/HE$ و $Dp^*=Dp/HE$ استفاده شده است. همچنین برای عمق آبستگي و طول گودال آبستگي از پارامترهای بدون بعد $Sd^*=Sd/HT$ و $Ls^*=Ls/HT$ بهره گرفته شده است. با افزایش عمق پایاب بدون بعد (Dp^*)، مشاهده شد که با افزایش Dc^* و متناظر آن عمق بحرانی جریان روی تاج سرریز، حداکثر عمق و طول گودال آبستگي افزایش می‌یابد، اما با افزایش عمق بحرانی بدون بعد Dc^* ، این مقادیر کاهش می‌یابد. طور متوسط اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۳/۷۵ 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.
واژگان کلیدی: آبستگي موضعی، بند، استهلاک انرژی، مدل عددی، Flow-3D	
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.37534.2842	
© 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

در شرایط ثابت جریان، زمان وقوع حداکثر عمق آبستگي در بسترهای ماسه‌ای برابر ضریبی از ساعت، در بسترهایی با مصالح چسبنده برابر ضریبی از روز و در بسترهای سنگی و شنی برابر ضریبی از ماده است. (ملویل و همکاران) اندازه ذرات بستر و نحوه دانه‌بندی آن نیز روی مقدار آبستگي تاثیر دارد. ابعاد حفرة آبستگي با افزایش اندازه ذرات بستر کاهش می‌یابد. هرچه دانه بندی ذرات یکنواخت‌تر باشد، ابعاد آبستگي هم بزرگتر خواهد بود. در رسوبات با دانه بندی غیر یکنواخت عمق آبستگي از آنچه در مصالح یکنواخت وجود دارد معمولاً کمتر است [۱].

آبستگي پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بسترهای فرسایش پذیر صورت می‌گیرد. مصالح بستر ممکن است از نوع غیر چسبنده مانند شن، ماسه باشد. به طوری کلی نرخ آبستگي در مصالح مختلف متفاوت است. مصالح دانه ای و سست توسط جریان آب سریع‌تر فرسایش می‌باشد، در صورتی که مصالح چسبنده مقاومت بیشتری در برابر فرسایش از خود نشان می‌دهند. البته آبستگي نهایی در مصالح چسبنده می‌تواند بیشتر از آبستگي در بسترهای ماسه‌ای باشد. (ملویل و همکاران)^۲

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Amir.ghamatloo@znu.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲Melville et al.

۲- بررسی تحقیقات پیشین

کماشی و دالوند (۲۰۲۵)، به بررسی ارزیابی مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم غیر پارامتریک برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پایه پل‌ها پرداختند. پژوهش آنها با استفاده از چهار مدل درخت تصمیم (DT^6 , GB^5 , RF^4 , XGB^3) به بررسی عوامل مؤثر بر عمق آبشستگی پایه پل‌ها پرداختند. نتایج آنها نشان داد مدل‌های RF ، XGB (ضریب تبیین ۰/۷۶ و ۰/۷۳) بیشترین دقت را دارند و پارامترهای عرض پایه، طول پایه و عمق جریان بالادست بیشترین تأثیر را بر آبشستگی نشان می‌دهند [۲]. کاردان و همکاران (۲۰۲۴)، به بررسی عددی میزان آبشستگی در پایین دست سرریزهای کنگره ای با پلان مثلثی با استفاده از نرم افزا Flow-3D پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییر زاویه و سرعت جریان، توزیع فشار و دما را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد و رفتار جریان را بهبود می‌بخشد. همچنین، تحلیل‌های انجام شده می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های هیدرولیکی و افزایش کارایی آنها مفید باشد [۳]. اکبری (۱۳۹۴)، به مدلسازی آبشستگی پایاب حوضچه آرامش با شیب معکوس، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، پرداخت و تأثیر پارامترهای مختلف بر حداکثر عمق آبشستگی و فاصله محل وقوع آن از انتهای حوضچه مورد بررسی قرار داد. پیربوداقی (۱۴۰۲)، بررسی احتمال پدیده کاویتاسیون و آبشستگی حوضچه آرامش در سرریز سد خاکی سهند با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D انجام داد و نتایج آن نشان داد که در سه ناحیه از طول سرریز سرویس سد سهند پدیده کاویتاسیون ایجاد می‌شود [۴]. محمودی و همکاران (۱۴۰۱)، تأثیر پارامترهای بهره برداری‌های مختلف، نسبت تنگ‌شدگی و طول دیوارهای جداکننده بر توسعه آبشستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش دریاچه‌های کشویی موازی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ابعاد حفره آبشستگی موضعی تابعی از بهره‌برداری متقارن و نامتقارن از دریاچه‌ها می‌باشد [۵]. صلیبی و همکاران (۱۴۰۱)، برآورد بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش (مطالعه موردی: بند سنگی-ملاتی حوزه آبخیز زیارت گرگان) با وجود ۲ ردیف لوله در بدنه بند برای عبور آب بالادست به پایین دست، پرداختند. یک مدل فیزیکی سازه

به مقیاس ۱:۲۰ ساخته شد. و آزمایش‌ها را برای دو حالت مختلف انجام دادند، حالتی که لوله‌ها به تنهایی جریان را به پایین دست منتقل کنند و حالتی که پس از تله اندازی رسوب‌ها و پر شدن لوله‌ها، جریان از روی سرریز عبور می‌کند، مورد شبیه سازی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ۹۴ درصد بیشینه عمق آبشستگی در ۸ ساعت اولیه آزمایش رخ داده است و همچنین بیشینه عمق آبشستگی به اندازه ۱۳۰ میلی‌متر در حالت انسداد لوله‌ها رخ می‌دهد. در این شرایط پرش هیدرولیکی به پایین دست حوضچه آرامش منتقل شده، عمق آبشستگی افزایش یافته و در عرض کانال نیز گسترش یافته و کمترین عمق آبشستگی در حالتی که جریان آب از ردیف لوله‌های پایین عبور می‌کنند، رخ می‌دهد. که در این شرایط، پرش هیدرولیکی درون حوضچه قرار می‌گیرد. همچنین نسبت عمق بیشینه آبشستگی به عمق آب در پایاب سازه برای حالتی که جریان از روی سرریز و لوله‌ها همزمان عبور کند، حدود ۲/۲ و برای زمانی که تنها جریان از درون لوله‌ها به پایین دست منتقل شود، حدود ۰/۶۲ است [۶]. خلیلی و فرهودی (۱۳۹۴)، تحقیقی با عنوان توسعه زمانی آبشستگی موضعی در پایین‌دست حوضچه آرامش با شیب معکوس انجام دادند. در این بررسی، پیشرفت زمانی نیمرخ‌های حفره آبشستگی موضعی در پایاب حوضچه آرامش با شیب معکوس براساس نتایج برداشت نیمرخ‌های حفره در محدوده گسترده‌ای از اعداد فرود، دانه‌بندی ذرات رسوبی، عمق پایاب، طول و شیب حوضچه بررسی شد. انجام یک آزمایش ۵۴ ساعته نشان داد نزدیک به ۸۷/۰۵٪ از عمق بیشینه، ۸۶/۰۳٪ از فاصله عمق بیشینه تا انتهای کف‌بند در پایان ۵۴ ساعت آزمایش، در مدت زمان ۲۴ ساعت از شروع آزمایش به دست می‌آید. همچنین، معادله ارتباط دهنده عمق حفره با مقیاس زمانی و هندسه سازه بالادست ارائه و ضریب‌ها و توان‌های این معادله به صورت توابعی از شیب حوضچه در نظر گرفته شد. تأثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد حفره بررسی و معادلاتی برای تخمین ابعاد حفره با زمان و در شرایط تعادل نسبی ارائه شد. برداشت نیمرخ‌های آبشستگی نشان دهنده وجود نوعی تشابه در شکل حفره در پایاب هر شیب است. همچنین نتایج نشان داد افزایش طول و شیب حوضچه معکوس سبب شکل‌گیری حفره‌ای با عمق کمتر و

⁵ Gradient Boosting

⁶ Decision Tree

³ XGBoosting

⁴ Random Forest

بخشی از پرش به بیرون حوضچه انتقال می‌یابد، عمق آبشستگی افزایش یافته و بر ارتفاع پشته افزوده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که کاهش طول حوضچه به اندازه ۸٪ تا ۲۴٪ نسبت به طول ثابت حوضچه، افزایش ۱۷٪ تا ۴۳٪ عمق آبشستگی را در شرایط برقراری دبی حداکثر را به دنبال دارد. در دبی حداقل درصد افزایش عمق آبشستگی به ترتیب ۴۰٪ و ۶۰٪ نسبت به طول ثابت حوضچه برای کاهش طول ۸٪ و ۲۴٪ می‌باشد [۹]. اپلی و چاوین^۹ (۲۰۱۴)، 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 میلی‌متر، 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 [۱۰]. ماچادو و همکاران^۹ (۲۰۲۰)، 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 [۱۱]. عبدی و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۳)، الگوهای جریان و آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پانوی مستطیلی نوع A

گستره طولی بیشتر می‌شود و حجم نسبی رسوبات انتقال یافته از واحد عرض حفره به ازای افزایش شیب حوضچه تا ۱۵٪ در حدود ۳۰٪ افزایش خواهد یافت [۷]. الوان و همکاران^۷ (۲۰۱۶)، آزمایش‌هایی 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 زیرجرانی و شرایط آب شفاف با استفاده از بستر یکنواخت بدون چسبندگی (خاک) به عنوان مواد بستر با اندازه دانه متوسط ($d_{50}=0.65$) 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، ۳۳، ۴۹) درصدی در حداکثر طول آبشستگی در مقایسه با کف‌بند افقی به ترتیب برای زاویه‌ها (۲/۷۳، ۵/۱۹ و ۷/۴۳) نشان داد [۸]. صالحی و شفاهی بجزستان (۱۳۹۵)، تحقیقی با عنوان آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش از نوع پرش هیدرولیکی پوشیده با المان‌های شش پایه تحت تأثیر کاهش طول حوضچه انجام دادند. توسعه حفره آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی می‌تواند منجر به تخریب خود سازه گردد که از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. با گسترش حوضچه‌های با بستر زیر ضرورت تکمیل مطالعات گذشته برای این سازه نیز اهمیت دارد. لذا در این تحقیق، یک مدل آزمایشگاهی شامل سرریز با زاویه‌ای ۳۰ درجه و ارتفاع ۰/۴ متر و حوضچه آرامش با بستر پوشیده از المان‌های شش پایه و طول ثابت ۱۲۶ سانتی‌متر ساخته شد و آبشستگی پایین دست در چهار حالت طول حوضچه برابر طول پرش، و کاهش طول حوضچه نسبت به طول پرش به میزان ۸٪، ۱۶٪ و ۲۴٪ در پنج عدد فرود مختلف جریان (۵/۳۴ تا ۸) بررسی شد. نتایج نشان داد که با کاهش عدد فرود و کاهش طول حوضچه به دلیل اینکه

⁹ Sá Machado et al.¹⁰ Abdi Chooplou et al.⁷ Melville et al.⁸ Epely-Chauvin et al.

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 کاهش یافت [۱۳]. شبیه‌سازی عددی پدیده‌های فیزیکی، ابزاری کارآمد برای تحلیل دقیق میدان جریان، بردارهای سرعت و کانتورهای فشار محسوب می‌شود. این روش با حذف محدودیت‌های آزمایشگاهی، امکان مطالعه سیستماتیک رفتار سیال در شرایط مختلف را فراهم می‌سازد. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی، ویژگی‌های دینامیکی جریان شامل توزیع سرعت و تغییرات فشار به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- معادله بقای جرم یا پیوستگی

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

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

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

۴- معادله مومنوم یا حرکت

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{v_f} \left[uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{v_f} \left[uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (3)$$

(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 دندان (فرورفتگی) در هندسه‌های مختلف، از جمله تاج‌های مثلثی، نیم‌دایره، سینوسی و مستطیلی و زیگزگی بررسی شد. مدل عددی سه بعدی نتایج نشان داد که مدل FLOW-3D جریان و آبشستگی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده است. دندان‌های تاج جانبی به طور قابل ملاحظه‌ای 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 دندان‌های 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 دندان‌های مستطیلی باعث می‌شود که محل حداکثر عمق آبشستگی در فاصله دورتری از پنجه سرریز رخ دهد. کمترین شیب‌های بالادست و پایین‌دست حفره آبشستگی در مدل‌هایی با تاج دندان (فرورفتگی) مستطیلی و تاج جانبی زیگزگی مشاهده شد [۱۲]. یوسف‌زاده و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۳)، 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 طول کف‌بند 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

¹¹ Yousefzadeh Podeh et al.

با توجه به شبیه‌سازی آبشستگی در پایین‌دست سرریز، در تحقیق حاضر و همچنین نتایج بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین دیگر بر روی آبشستگی و انتقال رسوب مشخص گردید که مدل آشفتگی (RNG) $k-\varepsilon$ نتایج دقیق‌تری را با نتایج آزمایشگاهی برقرار می‌کند. همچنین این مدل نسبت به مدل آشفتگی LES در مدت زمان کمتری، پدیده آبشستگی را شبیه‌سازی می‌کند. از این رو برای حل آشفتگی در مدل‌سازی جریان و فرسایش پایین دست سرریز از مدل آشفتگی (RNG) $k-\varepsilon$ استفاده شده است.

۷- معرفی مدل بند در تحقیق حاضر

مدل بند^{۱۳} بکار رفته در تحقیق حاضر از مطالعات آزمایشگاهی Muhammad Abbas and Tanaka (2022) انتخاب شده است. آزمایشات در یک کانالی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۶ متر، ۰/۵ متر و ۰/۷ متر انجام شد. پایین‌دست بند یک باکس رسوبی با ذرات رسوبی ماسه‌ای با قطر متوسط ۰/۴۵ میلی‌متر به ضخامت (HT) ۰/۱۵ متر با وزن مخصوص ۲/۶۵ و انحراف معیار هندسی ۱/۳۷ پر شده است. در بالای دست باکس رسوبی یک بند دوزنقه‌ای با طول (LL) و ارتفاع (HL) به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۱ متر و طول تاج ۰/۰۴ متر و سطح شیبدار ۱:۲ (افقی: قائم) و هم عرض کانال قرار دارد. فاصله تاج بند تا سطح رسوبات (HE) ثابت و برابر ۰/۲ متر می‌باشد. مشخصات بند و شماتیکی از کانال آزمایشگاهی Muhammad Abbas and Tanaka (2022) در شکل (۱) ارائه شده است. و در جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از بند ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{v_f} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + g_z \end{aligned} \quad (4)$$

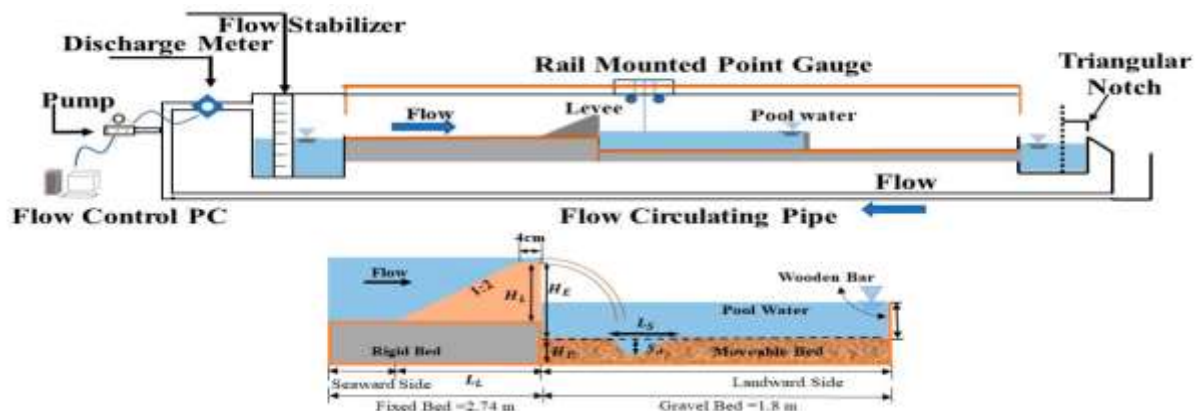
در روابط فوق، V_f کسر حجمی سیال، ρ دانسیته سیال، P فشار و g_z شتاب ثقل وارد بر جریان می‌باشد.

۵- معادلهٔ پروفیل سطح آزاد سیال

پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال یعنی $F(x, y, z)$ 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].

۶- مدل فرسایش در مدل‌سازی آبشستگی

مدل فرسایش^{۱۲} 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].



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی و مشخصات بند در آزمایشات [۱۷] Muhammad Abbas and Tanaka (2022)

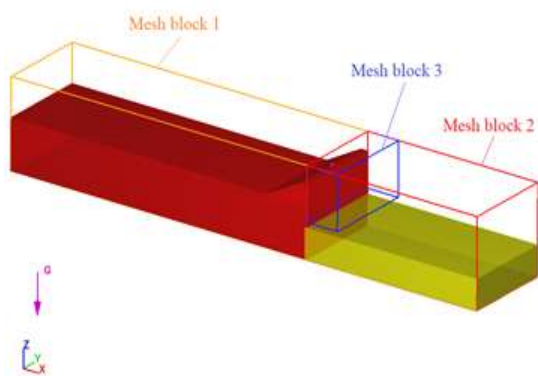
¹³ Levee

¹² Sediment Scour

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از مدل بند

D_c (m)	D_p (m)	H_T (m)	H_E (m)	D_c^*	D_p^*
۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۳۵
۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۳۵
۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۴۵
۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۴۵

یعنی $F(x, y, z)$ محاسبه می‌شود. همچنین این تابع قادر به نشان دادن مقادیر حجم سیال در همه سلول‌های محاسباتی می‌باشد که به وسیله معادله زیر نشان داده می‌شود:



شکل ۲- شبکه‌بندی مدل باکس رسوبی

جدول ۲- مشخصات چهار سایز مش در نظر گرفته شده برای آنالیز حساسیت مش

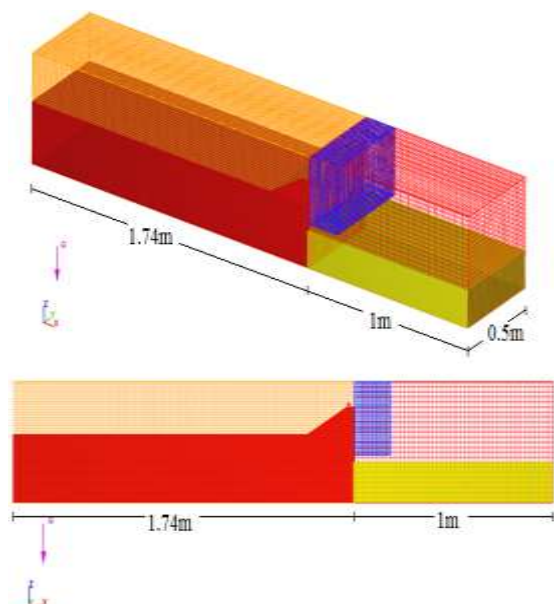
مدل	سایز مش بلاک اول (متر)	سایز مش بلاک دوم (متر)	سایز مش سوم (متر)	تعداد مش	نوع مش
۱	۰/۰۱۲	۰/۰۲۲	۰/۰۱	۳۲۵۳۱۳	درشت
۲	۰/۰۱۱	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۴۰۸۳۳۰	متوسط
۳	۰/۰۱	۰/۰۱۸	۰/۰۰۸	۵۴۴۳۹۹	ریز

۸- آنالیز حساسیت مش در شبکه محاسباتی

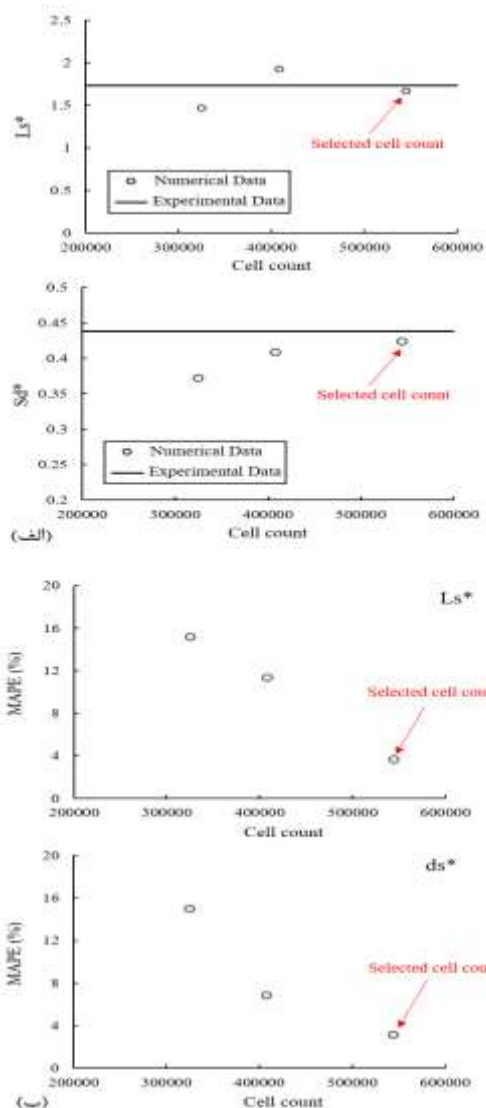
دو پارامتر Ls^* و Sd^* حاصل از نتایج خروجی نرم‌افزار برای ارزیابی دقت شبکه محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۲) مربوط شبکه بندی بند و باکس رسوبی، و شکل (۳) درصد خطای بدست آمده برای هر دو پارامتر براساس تعداد مش‌های محاسباتی انتخاب شده را نشان می‌دهد. با توجه به درصد خطای بدست آمده از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده می‌شود که با ریز شدن اندازه مش‌ها و افزایش تعداد مش، اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی کاهش می‌یابد. درصد خطای مطلق MAPE برای حالت سوم مش برای دو پارامتر Ls^* و Sd^* به ترتیب ۳/۶۳ و ۳/۱۴ درصد حاصل شد. لذا می‌توان حالت مش ریز با تعداد ۵۴۴۳۹۹ عدد را بعنوان مش بهینه و نهایی انتخاب کرد. در شکل (۴) پروفیل آبستگي ایجاد شده در پایین دست بند برای حالت‌های مختلف تعداد مش در نظر گرفته شده برای دامنه حل را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای شرایط هیدرولیکی $Dp^*=0/35$; $Dc^*=0/2$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نرم‌افزار در هر سه حالت، به خوبی توانسته گودال آبستگي ایجاد شده در پایین دست بند را شبیه‌سازی کند. اما با ریزتر شدن مش و افزایش تعداد مش، حداکثر عمق آبستگي و مقدار ارتفاع انباشت رسوبات در پایین دست گودال نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد. جدول ۲ مشخصات سه اندازه از سایز مش انتخاب شده برای آنالیز حساسیت مش را نشان می‌دهد. پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال

۹- مدل المان محدود برای مدلسازی

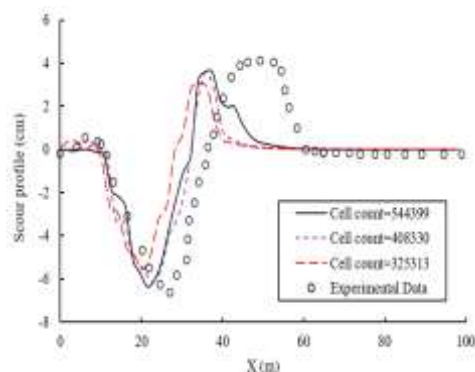
یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی‌های عددی مش‌بندی و تعیین ابعاد مش‌های انتخابی جهت یافتن بهینه‌ترین مدل در قیاس با نتایج واقعی است. شبکه بندی و ابعاد سلول می‌توانند دقت نتایج و زمان شبیه سازی را تحت تأثیر قرار دهند و لذا از این جهت، تعیین حداقل تعداد سلول‌ها به گونه‌ای که دارای دقت کافی در زمینه هندسه مدل و همچنین جزئیات جریان باشند، امری ضروری به نظر می‌رسد. هرچه ابعاد شبکه ریزتر باشد، می‌توان به دقت 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 شبیه سازی می‌شود. برای مدل بند و باکس رسوبی در پایین دست آن، با شبیه‌سازی مدل در سه حالت مختلف با اندازه‌های مش‌های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آن‌ها از روی داده‌های آزمایشگاهی در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. شکل (۵) شبکه بندی نهایی ایجاد شده برای دامنه حل و شکل (۶)، شرایط مرزی اعمال شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



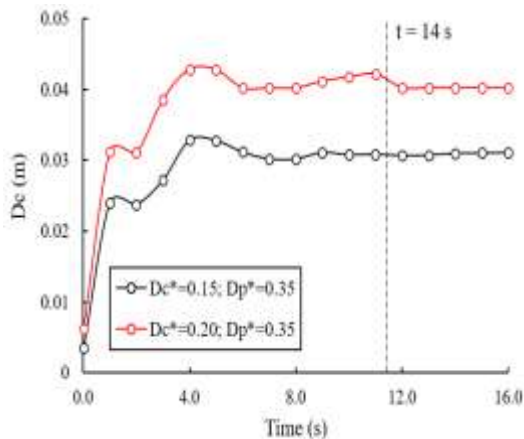
شکل ۵- مدل المان محدود، بالادست و پایین دست کانال



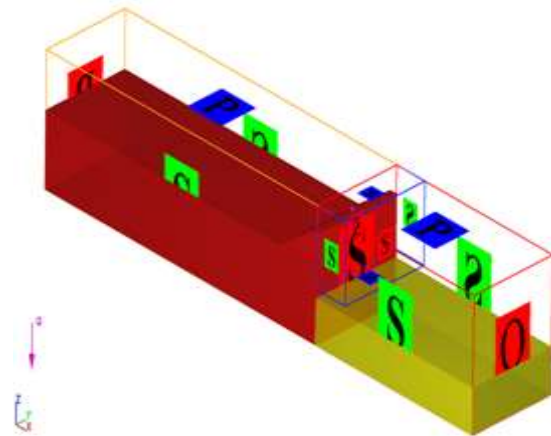
شکل ۳- مقایسه نتایج بدست آمده از آنالیز حساسیت مش نسبت به تعداد مش ب: Sd^* و LS^* الف: تغییرات پارامتر درصد خطا



شکل ۴- پروفیل گودال آبشستگی در پایین دست بند در سه حالت تعداد مش در نظر گرفته شده برای دامنه حل



شکل ۷- نتایج تاریخچه زمانی مربوط به عمق جریان بر روی تاج بند برای دو حالت $Dc^*=0/15; 0/20$



شکل ۶- شرایط مرزی اعمال شده در مدل

۱۰- صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

یکی از راه‌های صحت‌سنجی و مقایسه نتایج و همچنین تعیین محدوده‌ی درصد خطا بین داده‌های حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D با داده‌های آزمایشگاهی استفاده از رابطه (۶) جهت تعیین درصد خطای مطلق نسبی (MAPE) می‌باشد.

$$MAPE(\%) = \left| \frac{(M)_{EXP} - M_{NUM}}{(M)_{EXP}} \right| \times 100 \quad (6)$$

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 این تحقیق نتایج مربوط به تغییرات پارامترهای بدون بعد حداکثر عمق آبشستگی گودال (Sd^*) و طول گودال آبشستگی (Ls^*) بدست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D با نتایج توسط Muhammad Abbas and Tanaka (2022) مقایسه و صحت‌سنجی شده است. شکل (۷) نمودارهای تاریخچه زمان بدست آمده از عمق جریان عبوری از تاج بند بدست آمده از نتایج عددی را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که از زمان ۱۴ ثانیه به بعد تقریباً تغییرات نتایج عمق نسبت به زمان، ناچیز است و جریان به پایداری نسبی رسیده است. همچنین در این بازه زمانی نرخ تغییرات گودال آبشستگی تقریباً نزدیک به صفر بود.

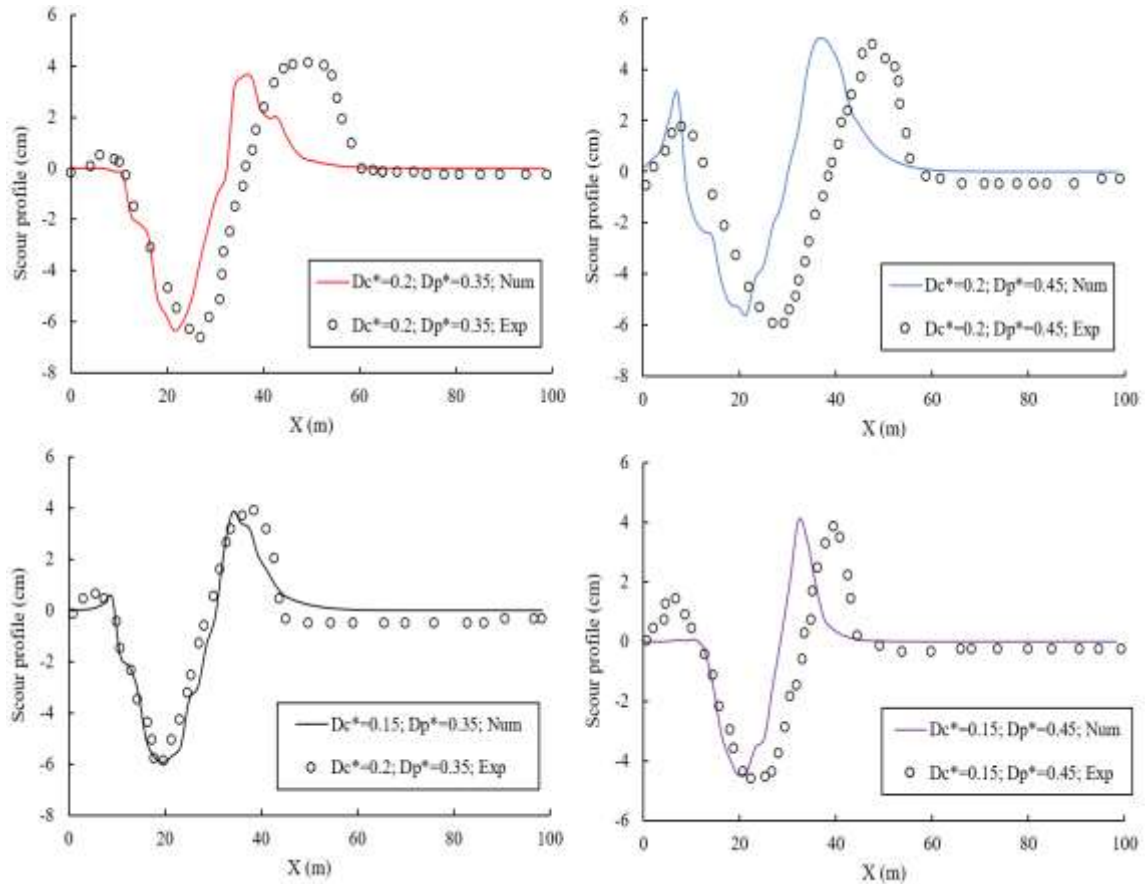
۱۱- مقایسه‌ی نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی

در شکل (۸) پروفیل گودال آبشستگی ایجاد شده در پایین‌دست بند برای شرایط هیدرولیکی مختلف جریان عبوری از آن را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. تفاوت شرایط هیدرولیکی در عمق جریان روی تاج بند و عمق پایاب می‌باشد.

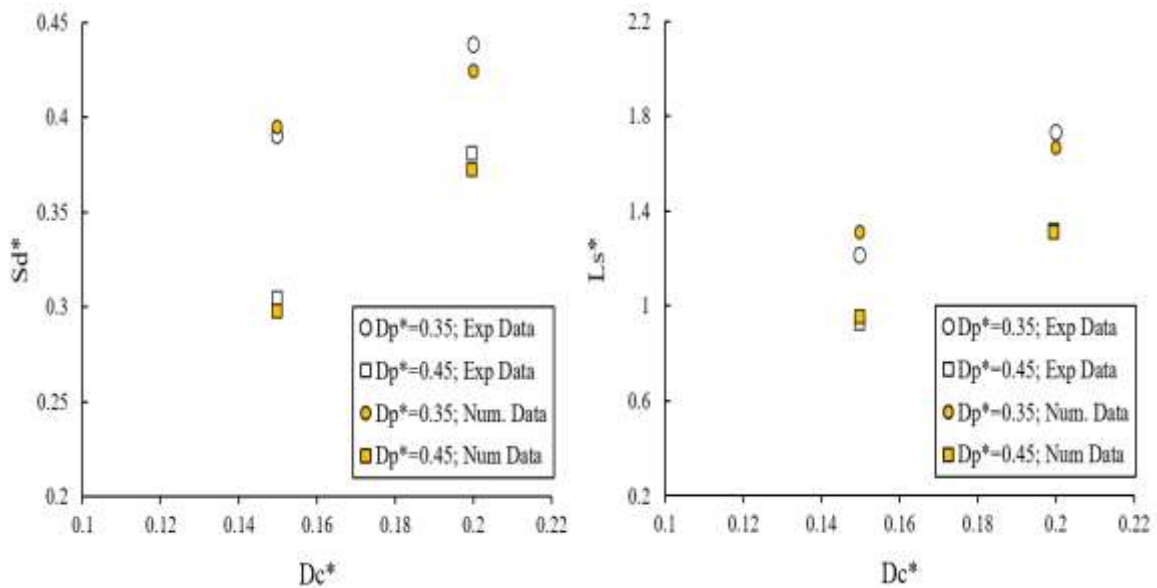
مشاهده می‌شود که روند تغییرات گودال آبشستگی برای هر چهار شرایط هیدرولیکی مختلف با نتایج آزمایشگاهی تقریباً یکسان است. بطوریکه در اثر ریزش جت جریان عبوری از بند، یک گودال آبشستگی ایجاد شده و در پایین‌دست گودال مقداری از رسوبات روی هم انباشت می‌شوند. برای عمق پایاب بدون بعد ثابت (Dp^*) ، با افزایش Dc^* و متناظر آن عمق بحرانی جریان روی تاج سرریز، حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین برای عمق بحرانی بدون بعد ثابت (Dc^*) ، با افزایش Dp^* ، حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی کاهش می‌یابد. در شکل (۹) تغییرات Sd^* و Ls^* را به ازای Dc^* برای اعماق پایاب متفاوت حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در این نمودار نیز مشخص هست که نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بوده و نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی فرآیند انتقال رسوب و آبشستگی پایین‌دست بند می‌باشد. توضیحات بالا در خصوص تغییرات حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی در این نمودار به خوبی با تغییرات Dc^* و Dp^* مطابقت دارد.

می‌شود که بطور متوسط اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را کمتر از ۴ درصد می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که تطابق خوبی بین نتایج حاکم است.

در جدول ۳ مقادیر Sd^* و Ls^* حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی را برای مدل بند در شرایط هیدرولیکی مختلف همراه با مقادیر خطای آن نشان می‌دهد. مشاهده



شکل ۸- مقایسه پروفیل گودال آبشستگی در پایین دست بند نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی



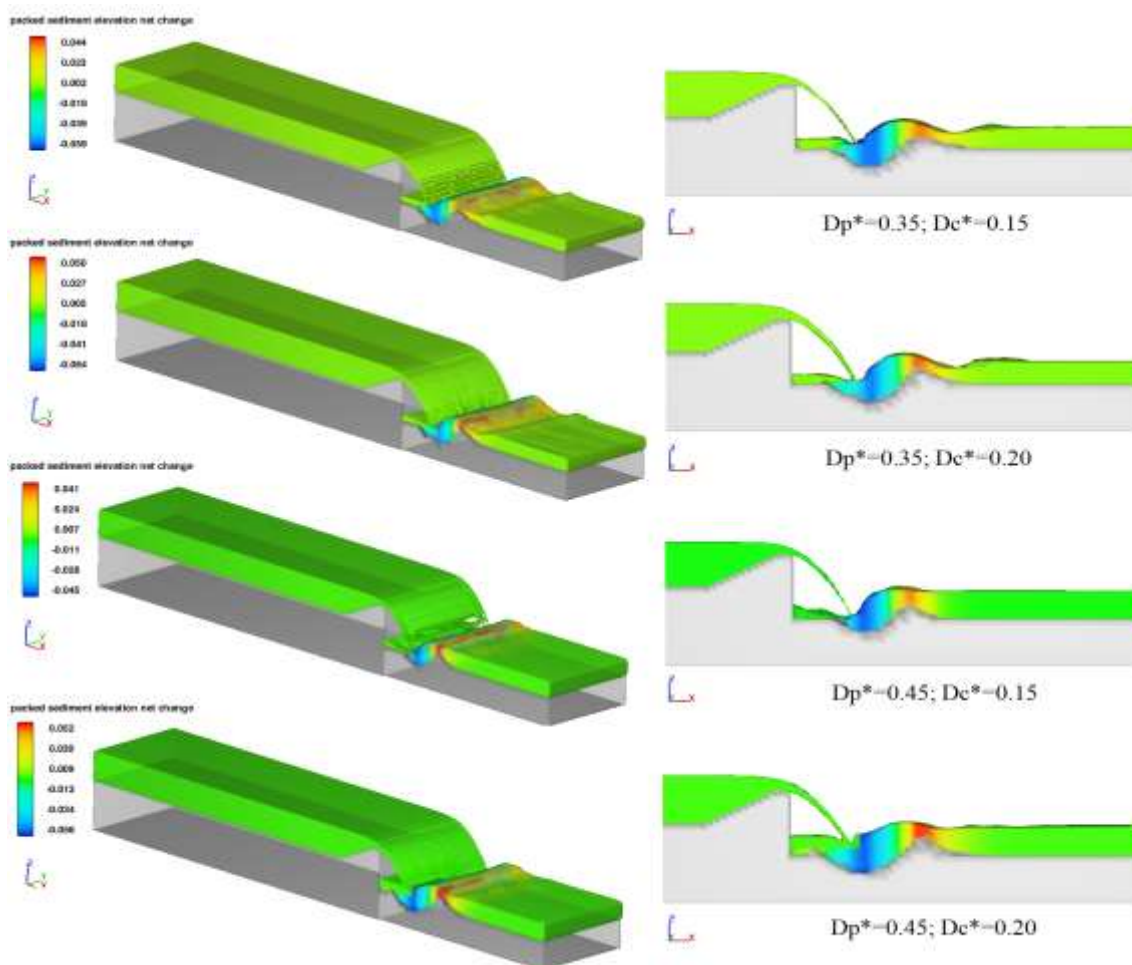
شکل ۹- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای تغییرات Sd^* و Ls^* به ازای Dc^*

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

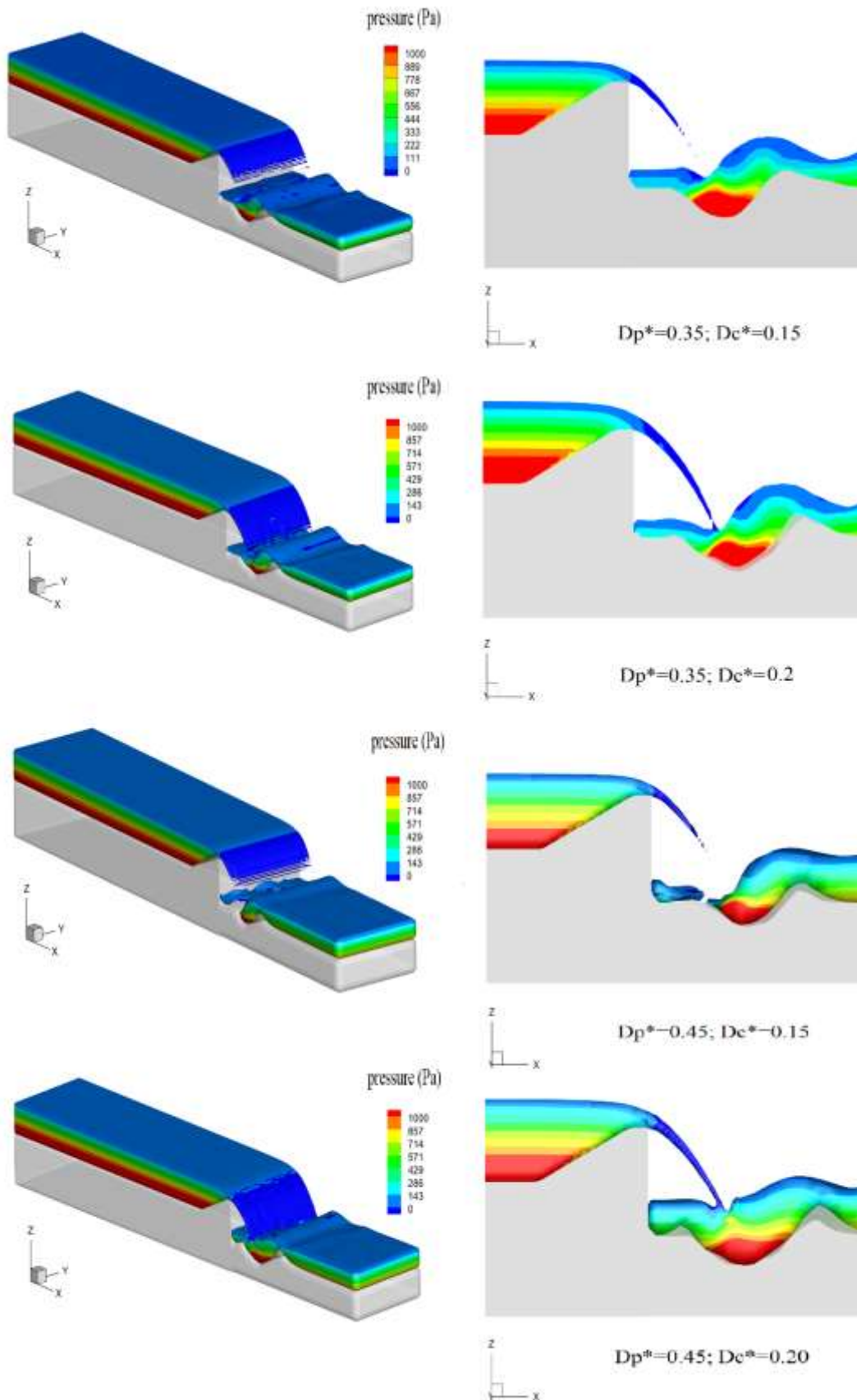
MAPE_Ls*	MAPE_Sd*	مقادیر عددی تحقیق حاضر		مقادیر آزمایشگاهی Muhammad Abbas and Tanaka (2022)		Dp*	Dc*	
		Ls*	Sd*	Ls*	Sd*			
۳/۶۳	۳/۱۴	۱/۶۶۶	۰/۴۲۴	۱/۷۲۹	۰/۴۳۸	۰/۳۵	۰/۲۰	
۰/۶۸	۲/۳۱	۱/۳۰۹	۰/۳۷۲	۱/۳۱۸	۰/۳۸۱	۰/۴۵	۰/۲۰	
۷/۷۱	۱/۱۷	۱/۳۰۹	۰/۳۹۵	۱/۲۱۶	۰/۳۹۰	۰/۳۵	۰/۱۵	
۲/۹۹	۲/۲۷	۰/۹۵۲	۰/۲۹۷	۰/۹۲۵	۰/۳۰۵	۰/۴۵	۰/۱۵	
۳/۷۵	۲/۲۲	میانگین درصد خطا						

در پایین دست بند به ازای شرایط هیدرولیکی شامل عمق بحرانی و عمق پایاب مختلف را نشان می‌دهند.

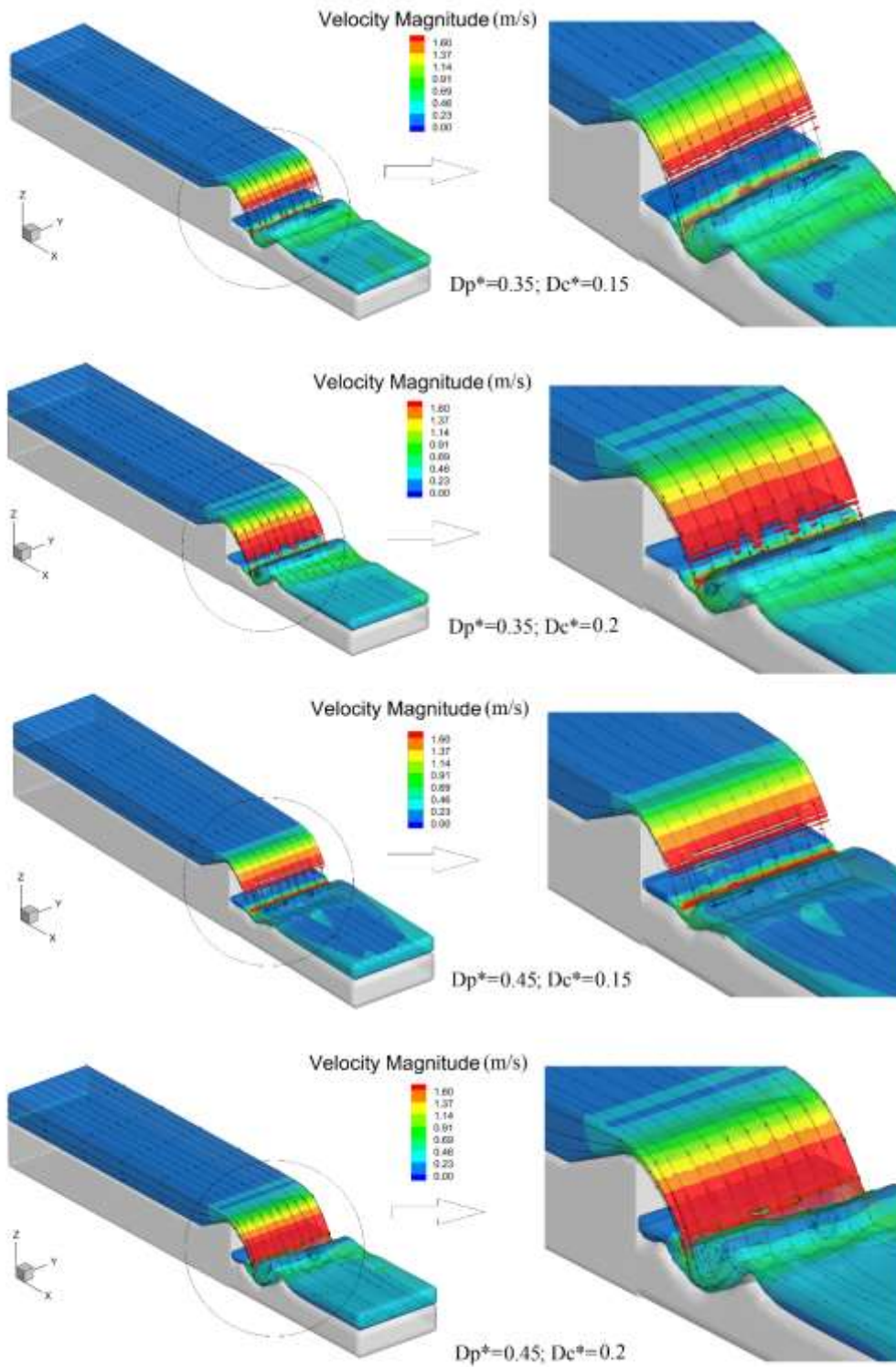
شکل (۱۰) نشان دهنده گودال آبستگي، شکل (۱۱) مربوط به فشار ایجاد شده و شکل (۱۲) بیانگر بردار سرعت



شکل ۱۰- گودال آبستگي ایجاد شده در پایین دست بند به ازای شرایط هیدرولیکی مختلف



شکل ۱۱- فشارهای ایجاد شده در پایین دست بند به ازای شرایط هیدرولیکی مختلف



شکل ۱۲- میدان سرعت ایجاد شده در پایین دست بند به ازای شرایط هیدرولیکی مختلف

۱۲- نتیجه گیری

در این تحقیق، مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط Muhammad Abbas and Tanaka (2022) تحت شرایط هیدرولیکی مختلف شامل دو عمق بحرانی روی تاج سرریز (Dc) برابر ۰/۰۳ و ۰/۰۴ متر و دو عمق پایاب (Dp) برابر ۰/۰۷ و ۰/۰۹ متر به صورت عددی مدل شده است. نتایج مربوط به عمق آبشستگی (Sd) و طول گودال آبشستگی (Ls) با نتایج حاصله از کار آزمایشگاهی مقایسه شده است. برای بررسی بهتر، از پارامترهای بدون بعد اعماق جریان روی تاج و پایاب یعنی $Dc^* = Dc/H_E$ و $Dp^* = Dp/H_E$ بهره گرفته شده است. همچنین برای عمق آبشستگی و طول گودال آبشستگی از پارامترهای بدون بعد $Sd^* = Sd/H_T$ و $Ls^* = Ls/H_T$ استفاده شده و مشاهده می شود که روند تغییرات گودال آبشستگی برای چهار حالت هیدرولیکی مختلف با نتایج آزمایشگاهی تقریباً یکسان است (شکل ۸). به طوریکه در اثر ریزش جت جریان عبوری از بند، یک گودال آبشستگی ایجاد شده و در پایین دست گودال مقداری از رسوبات روی هم انباشت می شوند. برای عمق پایاب بدون بعد ثابت (Dp^*)، با افزایش Dc^* و متناظر آن عمق بحرانی جریان روی تاج سرریز، حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی افزایش می یابد. همچنین برای عمق بحرانی بدون بعد ثابت (Dc^*)، با افزایش Dp^* ، حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی کاهش می یابد. در شکل (۹) تغییرات Sd^* و Ls^* را به ازای Dc^* برای اعماق

پایاب متفاوت حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد. در این نمودار نیز مشخص هست که نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می باشد. همانطور که در توضیحات بالا اشاره شد تغییرات حداکثر عمق و طول گودال آبشستگی مطابقت خوبی با تغییرات Dc^* و Dp^* دارد.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر سعید عباسی تقدیر و تشکر و قدردانی می گردد.

تعارض منافع

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

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانند.

مشارکت های نویسندگان

امیر قاملو: نگارش و مدلسازی مقاله

سعید عباسی: ویرایش تخصصی

منابع مالی

این مقاله برگرفته از کار آزمایشگاهی آقای Muhammad Abbas and Tanaka انتخاب شده است.

مراجع

- [1] Melville, Bruce W., and Yee-Meng Chiew. "Time scale for local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering* 125, no. 1 (1999): 59-65.
- [2] Komasi, Mehdi, and Rezvan Dalvand. "Evaluation of nonparametric decision tree models for predicting scour depth of bridges." *Water Resources and Climate Change* 1, no. 1 (2025): 40-50. (in Persian)
- [3] Kardan, Nazila, Mahdi Komasi, and Sara Samin Far. "Numerical Simulation of the Bed Scouring Downstream the Triangular Labyrinth Weirs Using Flow-3D." *Irrigation and Water Engineering* 14, no. 4 (2024): 53-73. (in Persian)
- [4] Akbari, Fatemeh. "Modeling of Backwater Scouring of Stilling Basin with Reverse Slope Using FLOW-3D." Master's thesis, Lorestan University, (2015). (in Persian).
- [5] Mahmoudi, Babak, Mohammad Hemmati, Mehdi Yasi, and Sajad Ahmad Hamidi. "Investigation of local scour downstream of parallel sluice gates." *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 16, no. 5 (2022): 937-949. (in Persian)
- [6] Salabi, Mohammad Ali, Amir Ahmad Dehghani, Mahdi Miftah Halaqi, and Abdul Reza Zahiri. "Estimating the Maximum Depth of Erosion in the Foothills of Hozacheh Ramesh (Case Study: Stone Mortar Embankment of Ziarat Gorgan Watershed)." (2022). (in Persian)
- [7] Khalili Shayan, Hossein, and Javad Farhodi. "Temporal Development of Localized Scour in the Downstream of a Reverse Slope Relaxation Basin." *Iranian Water Research* 9, no.2 (2015): 51-62. (in Persian)

- [8] 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.
- [9] Torfei Salehei, Leila, and Mahmood Shafai Bajestan. "Hydraulic Jump Stilling Basins Downstream Scour Covered with Six-Legs Elements under Reduction of Basin Length." *Irrigation Sciences and Engineering* 40, no. 4 (2018): 109-124. (in Persian)
- [10] Epely-Chauvin, Gaël, Giovanni De Cesare, and Sebastian Schwindt. "Numerical modelling of plunge pool scour evolution in non-cohesive sediments." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 8, no. 4 (2014): 477-487.
- [11] 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): 383-394.
- [12] Abdi Chooplou, Chonoor, Masoud Ghodsian, Davoud Abediakbar, and Aram 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.
- [13] Yousefzadeh Podeh, Fatemeh, Mahdi Esmæili Varaki, Behnam Shafiei Sabet, and Sahameddin Sahameddin Mahmoudi Kurdistan. "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): 105-125.
- [14] Yakhot, V. S. A. S. T. B. C. G., Steven A. Orszag, Siva Thangam, T. B. Gatski, and CG1167781 Speziale. "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 4, no. 7 (1992): 1510-1520.
- [15] GhasemZadeh, F. 2015. *Simulation of Hydraulic Problems in FLOW-3D*. Iran: Naavar Publications, (2015). (in Persian)
- [16] Hedayatifar, M., and M. Poulak. *Fluid Dynamics Simulation with FLOW-3D*. Tehran: Ati Nagar Publications, (2014). (in Persian)
- [17] Abbas, Fakhhar Muhammad, and Norio Tanaka. "Utilization of geogrid and water cushion to reduce the impact of nappe flow and scouring on the downstream side of a levee." *Fluids* 7, no. 9 (2022): 299.