



Research Paper

Numerical Study of the Effect of Apron Geometry on Downstream Scouring

Najmeh Eskandari¹, Mohammad Najafzadeh² and Kambiz Farrahi-Moghaddam^{3*}

¹M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

²Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

³Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Article information

Received: September 18, 2023

Revised: November 20, 2023

Accepted: November 21, 2023

Keywords:

Apron Length
Apron Roughness
Bed Roughness
Numerical Simulation
Scour Hole

*Corresponding author:

k.farahi@kgut.ac.ir



Abstract

The contrast in bed roughness versus apron roughness has, until recently, received insufficient attention, despite its significant role in causing downstream scouring. In this study, a validated numerical model has employed to investigate the impact of apron geometry, including its roughness and length, on downstream scouring. In present model, at first, the model was calibrated by simulating a physical model that investigated the scouring downstream of the apron under the influence of changes in apron roughness, particle densimetric Froude number, and gradation. Then the effect of changing the apron length on the maximum downstream scour depth was investigated numerically. Finally, a relationship for the maximum scour depth was proposed by using all the numerical model outputs. Selsby-Whitehouse equation was determined as the best method for calculating the critical Shields number, and the best results for the numerical model were obtained by selecting the bed load coefficient equal to 13. The comparison between the model outputs and the physical model results yielded satisfactory outcomes, demonstrating that the model can predict over 80% of the laboratory data with an error rate below 20%.

How to cite this paper: Eskandari, N., Najafzadeh, M., & Farrahi-Moghaddam, K. (2023). Numerical study of the effect of apron geometry on downstream scouring. *Environ. Water Eng.*, 10(4), 151-164. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.416685.1890> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** Journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Most of the studies conducted on scour phenomena resulting from the presence of vortices and severe turbulence due to the existence of hydraulic structures, the occurrence of hydraulic jumps, insufficient dissipation of kinetic energy, or the water jet outlet. This happens while in the downstream horizontal aprons where there is no difference in water head between the upstream and downstream, or no turbulence resulting from jumps exists; due to the different roughness of the bed compared to the apron roughness, scouring also occurs. Therefore, the aim of the present research is to numerically investigate the difference in apron roughness and bed material on downstream scour. Also, the study of the effect of factors such as the particle densimetric Frude number on the scour level using the numerical model generated in FLOW-3D v11.04 software is another goal of this research. Furthermore, after validating the numerical model, the effect of the length of the apron on the sediment pattern was also examined.

Material and Methods

To investigate the scour condition downstream of the apron, the research was conducted in several stages. Initially, the numerical model was sensitivity-tested for mesh dimensions. In this stage, the results of the experimental model by Knight et al. (1984) were utilized. The optimal aspect ratios in the perpendicular directions X:Y, Y:Z, and Z:X were determined as 6:0.4, 1, and 6:0.4, respectively. Here, X, Y, and Z represent the longitudinal, transverse, and vertical directions relative to the channel bed. It is worth mentioning that finer meshes were employed in the apron and its downstream area, and thus, the specified aspect ratio of 6.04 was limited to 1.5 in the study area. Additionally, the k-ε model with a root mean square error of 0.062 was chosen for turbulence modeling. Then, based on the dimensional analysis conducted in this research, Eq. 1 was proposed for the maximum scour depth:

$$\frac{d_s}{\varepsilon} = f\left(d_{50}/\varepsilon, Fr^*, L/\varepsilon\right) \quad (1)$$

d_s , ε , d_{50} , L , and Fr^* represent, respectively, the maximum scour depth, apron roughness, apron length, and the particle densimetric Froude number. Following that, the numerical model was calibrated for various values of empirical coefficients associated with the software, and

subsequently validated. In this stage, the laboratory study by Koochak (2012) was simulated. Boundary conditions including specified velocity, outflow, and symmetry were considered for the upstream, downstream, and flow surface boundaries, respectively. The wall boundary condition was applied to the channel walls and bed. The values of maximum packing fraction (C_{max}), entrainment coefficient (Ec), bed load coefficient (BDL), and angle of repose (ϕ) were selected as 0.45, 0.018, 13, and 32° , respectively. The critical Shields number (θ_{cr}) was calculated using the Soulsby - Whitehouse equation. Subsequently, the calibrated numerical model was employed to calculate the maximum scour depth downstream of the apron by varying its length. Finally, based on the accumulated outputs from the numerical model, an equation for the maximum scour depth was proposed. To obtain an accurate relationship for the introduced function in Eq. 1, the SPSS 26 software was used.

Results

In the physical study conducted by Koochak (2012), all experiments were performed for an apron length of 0.73 m. In this stage, the numerical investigation of the effect of apron length on the maximum scour depth downstream of the apron was carried out. For this purpose, apron lengths of 2 m and 2.5 m were utilized. Table 2 illustrates the calculated maximum scour depths in this examination.

Table 1 The maximum scour depth calculated by the present numerical model downstream of aprons with different lengths

Experiment	Apron length in	Apron	$ds-N$
2	0.73	2	34.31
2	0.73	2.5	30.14
5	0.73	2	27.26
5	0.73	2.5	25.88
8	0.73	2	24.81
8	0.73	2.5	24.60
11	0.73	2.5	25.14
15	0.73	2	35.59
18	0.73	2.5	28.19
21	0.73	2.5	26.05
24	0.73	2	25.35
24	0.73	2.5	24.27

In order to derive the equation related to the function defined in Eq. 1, the overall outputs of the calibrated numerical model, as well as the outputs related to the effect of varying apron

length (Table 1), were utilized. In this regard, Eq. (2) was derived with $R^2=0.94$ and $RMSE=0.86$:

$$d_s/\varepsilon = Fr^{*6.7} \times (D_{50}/\varepsilon)^{1.25} \times (L/\varepsilon)^{-0.16} \times 0.045 \quad (2)$$

The comparison of Fig. 1 demonstrates that Eq. 2, with and without the exclusion of six outlier data points, can predict experimental values with root mean square errors of 0.859 and 1.3, respectively. Additionally, Fig. 1 corresponds to an absolute percentage error of 0.09 and 2.5, respectively, when considering the mean.

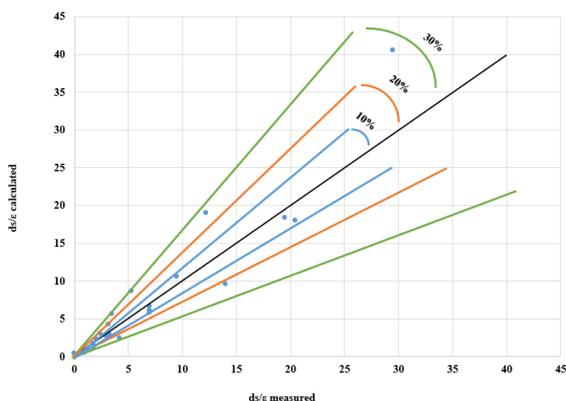


Fig. 1 Comparison graph of d_s/ε values calculated vs the values measured in the physical model of Koochak (2012)

Conclusions

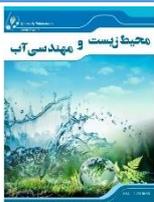
1. The best criterion for defining the Shields number is the Soulsby - Whitehouse equation, and there is no need to consider corrections related to changes in bed slope.
2. Considering the values of C_{max} , Ec , BDL , and ϕ , equal to 0.45, 0.018, 13, and 32° , respectively, yielded values closest and most suitable to experimental results for calculating the maximum scour depth.
3. The proposed equation can predict over 80% of experimental values related to the maximum scour depth with an error of less than 20%.
4. The length of the apron significantly affects the maximum scour depth occurring downstream, with an increase leading to a reduction in scour depth. Additionally, with an increase in the ratio of apron roughness to bed roughness, the impact of increasing apron length on scour depth decreases. This effect diminishes with an increase in particle diameter.

Data Availability

The data used in this research are presented in the text of the article.

Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

مطالعه عددی تأثیر هندسه کفبند بر آبشستگی پایین دست

نجمه اسکندری^۱، محمد نجفزاده^۲ و کامبیز فرهی مقدم^{۳*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۳استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۶/۲۷]	تا کنون تفاوت بین زبری بستر و زبری کفبند، علی‌رغم نقش مهم آن در آبشستگی پائین دست، کم‌تر بررسی شده است. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل عددی اعتبارسنجی شده به بررسی تأثیر هندسه (زبری و طول) کفبند بر وضعیت آبشستگی پائین دست آن پرداخته شد. در مدل حاضر با شبیه‌سازی یک مدل فیزیکی که آبشستگی پائین دست کفبند را تحت تأثیر تغییرات زبری آن، عدد فرود ذره و دانه‌بندی بررسی کرده بود، مدل عددی واسنجی شد. سپس تأثیر تغییر طول کفبند بر روی بیشینه عمق آبشستگی پائین دست آن به صورت عددی بررسی شد. در نهایت با استفاده از خروجی‌های مدل عددی یک رابطه برای بیشینه عمق آبشستگی پیشنهاد شد. بر اساس نتایج، معادله سلسبی - وایت هاوس برای محاسبه عدد شیلدز بحرانی انتخاب شد، و ضریب بار بستر برابر ۱۳ تعیین شد. مقایسه نتایج به دست آمده از رابطه مذکور با خروجی‌های مربوط به مدل فیزیکی رضایت‌بخش و نشان داد که رابطه قادر است که بیش از ۸۰٪ مشاهدات آزمایشگاهی را با خطای کم‌تر از ۲۰٪ پیش‌بینی کند.
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۸/۲۹]	
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۸/۳۰]	
واژه‌های کلیدی: چاله آبشستگی زبری بستر شبیه‌سازی عددی طول کفبند	
*نویسنده مسئول: k.farahi@kgut.ac.ir	

نحوه استناد به این مقاله:

اسکندری، نجمه، نعمت‌زاده، محمد و فرهی مقدم، کامبیز. (۱۴۰۳). مطالعه عددی تأثیر هندسه کفبند بر آبشستگی پائین دست. محیط-زیست و مهندسی آب. 10(4) 151-164. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.416685.1890>



۱- مقدمه

et al. راهکارهای جلوگیری از فرسایش کفبند با طراحی پایاب به صورت پلکانی بررسی شد. با توجه به ارزیابی های صورت گرفته در مطالعه ایشان، این روش باعث کاهش فرسایش کفبند تا ۹۵٪ شد.

Basiouny et al. (2018) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع عناصر زبری و ارتفاع کفبند موج دار بر هندسه آبشستگی پائین دست پرش های هیدرولیکی مستغرق پرداختند. با استفاده از نتایج، فرمول های ساده ای جهت تخمین بیشینه طول و عمق چاله آبشستگی پس از کفبندهای موج دار ارائه شد. همچنین (Aamir and Ahmad 2019) در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی آبشستگی ناشی از جت های دیواره^۲ پائین دست کفبندهای صاف و زبر، تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق آبشستگی را بررسی کردند. ایشان تغییرات مکانی و زمانی کف فرسایش پذیر را تحلیل کردند. Aamir et al. (2022) در مطالعات آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی پائین دست کفبندهای زبر و صاف تحت تأثیر جت های دیواره ناشی از باز شدن دریچه پرداختند. در نهایت یک معادله مبتنی بر همبستگی جهت تخمین میزان آبشستگی ارائه و استفاده از کفبندهای زبر در پائین دست دریچه های کشویی را پیشنهاد دادند. (Kumar and Ahmad 2022) میزان تأثیر کفبند بر عمق و طول حفره آبشستگی در پائین دست سرریز کلیدپیانویی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود کفبند عمق چاله آبشستگی را ۶۰ تا ۸۰٪ کاهش داد. Varaki et al. (2022) نیز تأثیر افزایش طول کفبند بر میزان آبشستگی در پائین دست سازه های کنترل تراز در کانال های دوزنقه دارای پیچ و خم را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. با استفاده از نتایج یک رابطه مبتنی بر همبستگی برای تخمین میزان آبشستگی پس از سازه های کنترل در کانال های دوزنقه ای با دقت قابل قبولی استخراج شد.

از مطالعات عددی انجام شده در خصوص آبشستگی در سال های اخیر می توان به مطالعات Moghadam et al. (2019, 2020) اشاره نمود. Moghadam et al. (2019) با هدف کاهش نیاز به استفاده از پارامترهای تجربی

مدل های آزمایشگاهی محدودیت های زیادی در شبیه سازی پدیده های مرتبط با آبشستگی با اندازه واقعی و همچنین تعداد خروجی های قابل قبول دارند. این در حالی است که در مدل سازی های عددی می توان با استفاده از مدل های اعتبارسنجی شده با صرف وقت و هزینه کم تر به خروجی های بیش تر و تحلیل های دقیق تر دست یافت (Merritt et al. 2003). از طرفی اگرچه اختلاف بار آبی بین بالادست و پائین دست سازه و یا تلاطم ناشی از پرش هیدرولیکی در مورد سازه کفبند افقی فرسایش ناپذیر صدق نمی کند، ولی متفاوت بودن زبری بستر با زبری کفبند منجر به آبشستگی پائین دست آن می شود (Koochak 2012). از این رو باتوجه به پیشرفت های اخیر در زمینه مدل های عددی و نیز در زمینه سخت افزار رایانه ها و باتوجه به مزایای این مدل ها، بررسی الگوی جریان و رسوب به صورت عددی ابزار مؤثری در شناخت بهتر و دقیق تر پدیده های شکل گرفته در اطراف این سازه ها است.

Hamidifar and Omid (2010) در بررسی آزمایشگاهی آبشستگی رسوبات غیرچسبنده در پائین دست کفبند، اثر اندازه دانه، عمق پایاب و عدد فرود^۱ بر آبشستگی موضعی بستر ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریچه کشویی را بررسی کردند. در پژوهش ایشان پارامترهای مشخصه گودال آبشستگی به صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بدون بعد ارائه شد که در طراحی ها جهت حفاظت بستر در برابر آبشستگی استفاده می شود. Koochak (2012) در پژوهش خود به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی همچون زبری کفبند و عدد فرود ذره بر آبشستگی پائین دست آن پرداخت و فرمولی جهت تخمین ابعاد چاله آبشستگی پیشنهاد داد. (Espa and Sibilla 2014) در مطالعه تجربی تأثیر رژیم های مختلف بر آبشستگی پائین دست کفبند به بررسی میزان پایداری سازه ها و تکمیل پژوهش های پیشین در این زمینه پرداختند. نتایج نشان داد که اشکال چاله آبشستگی برای رژیم های مختلف متفاوت هستند، و عمق چاله آبشستگی مستقیماً متأثر از جت خروجی آب از دریچه بالادست است. در مطالعه آزمایشگاهی (Hamidifar 2018)

²Wall jets

Environment and Water Engineering

Vol. 8, No. 4, 2022

¹Froude Number

محیط زیست و مهندسی آب

دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱



متداول و نیازمند صرف هزینه و وقت بسیار است (Merritt et al. 2003). در پژوهش حاضر از روش عددی، که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و همچنین کاربردهای فراوانی دارد، استفاده شد. FLOW-3D نرم‌افزاری توانمند در زمینه دینامیک سیالات است که به‌وسیله شرکت Flow Science تولید، توسعه و پشتیبانی شده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D v11.04 میزان آبشستگی پائین‌دست کفبند تحت تأثیر تغییرات هندسه آن (طول و زبری) به صورت سه‌بعدی و دوفازی متشکل از جریان آب زلال و رسوبات بستر بررسی شد. در این راستا با شبیه‌سازی مطالعه آزمایشگاهی (Koochak 2012)، که در کانال آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد، نتایج مدل عددی حاضر اعتبارسنجی شد. در مطالعه (Koochak 2012) از یک کانال آزمایشگاهی به عرض ۰/۳ m، طول ۱۵ m و ارتفاع ۰/۵ m استفاده شد. جریان آب مورد نیاز این کانال به‌وسیله یک پمپ سانتریفیوژ با دبی با بیشینه ظرفیت ۳۰ l/s از مخزن تأمین و به درون حوضچه آرام‌کننده وارد شد. برای بررسی تأثیر زبری کفبند افقی بر آبشستگی پائین‌دست، کفبندی به شکل مکعب‌مستطیل به طول ۰/۷۳ m، عرض ۰/۳ m و ارتفاع ۰/۱ m ساخته شد. در مطالعه آزمایشگاهی مذکور در مجموع ۲۴ آزمایش به منظور بررسی اثر اختلاف زبری کفبند افقی و بستر بر آبشستگی پائین‌دست آن انجام شد. این آزمایش‌ها با در نظر گرفتن چهار اندازه زبری کفبند (E) متفاوت (۲، ۵، ۱۰ و ۱۴/۲۸ mm) و دو دانه‌بندی مصالح بستر با قطر متوسط d_{50} مختلف (۰/۸ و ۱/۴ mm) انجام شد. همچنین در این آزمایش‌ها بیشینه عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف ثبت و مشاهده شد که در نظر گرفتن ۲ hr زمان برای تثبیت وضعیت آبشستگی در هر آزمایش کافی است. جدول (۱) نتایج به دست آمده برای بیشینه عمق آبشستگی (d_s) در هر یک از آزمایش‌های (Koochak 2012) را نشان می‌دهد. در این جدول Fr^* عدد فرود ذره است.

در معادلات حاکم از رویکرد دو سیاله کامل^۱ بر اساس الگوریتم شکاف زمانی^۲ در محاسبات مربوط به انتقال رسوب و آبشستگی استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از دقت بالای محاسبات (با خطای جذر میانگین مربعات در حدود ۰/۰۶) مربوط به انتقال رسوب بود. (Samma et al. 2022) بررسی مکانیزم آبشستگی ناشی از کارکرد هم‌زمان جت‌های دیواره و ریزشی مستغرق با استفاده از FLOW-3D پرداختند. بر اساس نتایج مربوط به فرایند آبشستگی، بیش‌ترین نرخ فرسایش در مراحل اولیه اتفاق افتاد. بر اساس گزارش‌های ایشان در ۱۵٪ ابتدایی زمان تعادل، ۸۰، ۶۷ و ۷۶٪، به ترتیب، بیشینه طول، عمق و عرض آبشستگی رخ داد. شایان ذکر است که در سال‌های اخیر علاوه بر مدل‌های فیزیکی و عددی ذکر شده، استفاده از مدل‌های محاسبات نرم نیز به منظور تخمین پارامترهای مربوط به جریان و رسوب در اطراف سازه‌های هیدرولیکی رایج شده است (Homaei and Najafzadeh 2022; Mobayen et al. 2023).

اکثر مطالعات صورت‌گرفته در خصوص آبشستگی ناشی از وجود گردابه‌ها و تلاطم شدید آب به علت وجود سازه‌های هیدرولیکی، به وجود آمدن پرش هیدرولیکی، عدم استهلاک انرژی جنبشی کافی، و یا جت خروجی آب بوده است. این در حالی است که در پائین‌دست کفبندهای افقی که اختلاف بار آبی بین بالا و پائین‌دست و یا تلاطم ناشی از پرش وجود ندارد، به دلیل متفاوت بودن زبری بستر با زبری کفبند نیز آبشستگی اتفاق می‌افتد؛ لذا هدف از پژوهش حاضر بررسی عددی اختلاف زبری کفبند و مصالح بستر بر آبشستگی پائین‌دست آن است. همچنین بررسی تأثیر عواملی مانند عدد فرود ذره بر میزان آبشستگی با به‌کارگیری مدل عددی تولید شده در نرم‌افزار FLOW-3D از دیگر اهداف پژوهش حاضر است. همچنین پس از واسنجی مدل عددی، تأثیر طول کفبند بر الگوی رسوب نیز مطالعه شد.

۲- مواد و روش‌ها

در بسیاری از مسائل واقعی تعیین پارامترهای مؤثر بر پدیده مورد نظر به شکل تئوریک دشوار و گاه غیرممکن است. از طرفی استفاده از روش تجربی در تعیین مقادیر پارامترها بسیار

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده در مطالعه Koochak (2012) و مقادیر اندازه‌گیری شده برای بیشینه عمق آبشستگی (d_s)

Table 1 Characteristics of Koochak (2012) study experiments and reported values for maximum scour depth (d_s)

No.	d_{50} (mm)	ε (mm)	Fr^*	d_s (mm)	
1	0.8	2	3.04	28	
2			3.35	39	
3			3.77	59	
4		5	2.87	21	
5			3.3	35	
6			3.91	61	
7		10	2.87	18	
8			3.3	33	
9			3.89	53	
10		1.4	14.28	2.67	14
11				3.23	25
12				3.87	50
13	2		2.54	14	
14			2.78	19	
15			3.01	41	
16	5		2.68	12	
17			2.82	16	
18			3.01	35	
19	10		2.49	10	
20			2.53	13	
21			2.94	30	
22	14.28	2.37	0		
23		2.68	12		
24		3.06	29		

$$\frac{d_s}{\varepsilon} = f(d_{50}/\varepsilon, Fr^*, Re, y/\varepsilon, G_s) \quad (1)$$

که، G_s چگالی نسبی ذرات بستر، Re عدد رینولدز و y نمایانگر عمق جریان بر روی کفبند است. باتوجه به این که مقدار G_s در آزمایش‌های Koochak (2012) ثابت بود و باتوجه به ناچیز بودن لزجت، از متغیرهای G_s و Re صرف نظر شد. همچنین بر اساس نظر Koochak (2012) از آنجا که عمق جریان آب روی کفبند متناسب با عدد فرود ذره مورد نظر تنظیم شد، هیچ گونه ارتباط مشخصی بین بیشینه عمق آبشستگی و عمق آب در زبری‌های مختلف مشاهده نشد. وی رابطه (۱) را به صورت رابطه (۲) خلاصه کرد (Koochak 2012):

$$\frac{d_s}{\varepsilon} = f(d_{50}/\varepsilon, Fr^*) \quad (2)$$

به طور کلی هندسه کفبند شامل طول و زبری آن است. در تحلیل ابعادی Koochak (2012) تأثیر طول نادیده گرفته شد. یکی از اهداف پژوهش حاضر در نظر گرفتن طول کفبند

در مدل‌سازی‌های عددی باتوجه به شکل جریان و شرایط مسئله تعیین شرایط مرزی دارای اهمیت بالایی است. در این پژوهش شرایط مرزی سرعت ثابت^۱، جریان خروجی^۲ و تقارن^۳، به ترتیب، برای مرز بالادست، مرز پائین دست و سطح جریان، و شرط مرزی دیواره^۴ برای دیواره‌ها و کف کانال در نظر گرفته شد تا سرعت صفر جریان در دیواره‌ها ایجاد شود. همچنین در تعریف هندسه کانال یک بلوک جداگانه به کفبند اختصاص یافت و بر اساس جدول (۱) زبری مورد نظر برای آن تعریف شد.

۲-۱- آنالیز ابعادی

بر اساس تحلیل ابعادی صورت گرفته در پژوهش Koochak (2012) و با استفاده از تئوری پی باکینگهام^۵ رابطه بی بعد شده برای بیشینه عمق آبشستگی پائین دست کفبند به صورت رابطه (۱) به دست آمد:

⁴ Wall

⁵ Buckingham's II theorem

¹ Specified Velocity

² Outflow

³ Symmetry

تا ۱۹/۱۲ و در محدوده دبی‌های بین ۱/۹۸ I/s تا ۲۸/۶۶ روابط تجربی خود را ارائه دادند. در پژوهش حاضر به منظور حساسیت‌سنجی نسبت به ابعاد شبکه‌بندی، یکی از آزمایش‌های ایشان با نسبت عرض کانال به عمق جریان (B/H) برابر ۷/۷۳ و دبی ۲۲/۳۴ I/s بطور تصادفی انتخاب شد. برای اعتبارسنجی، مدل‌سازی عددی برای سه آزمایش دیگر تکرار شد.

باتوجه به شبیه‌سازی‌های متعدد صورت‌گرفته در پژوهش حاضر، نسبت ابعاد بهینه در جهات عمود بر هم برای $X:Y$ ، $Z:X$ و $Y:Z$ ، به ترتیب، ۶/۰۴، ۱ و ۶/۰۴ تعیین شد. Y ، X و Z ، به ترتیب، نشان‌دهنده راس‌های طولی، عرضی، و عمود بر کف کانال هستند. مقدار پیشنهاد شده به وسیله نرم‌افزار برای نسبت‌های ذکر شده بین ۱ تا ۲ است. باتوجه به این که در مدل‌سازی عددی جریان در کانال‌های باز معمولاً طول کانال بسیار بیش‌تر از عرض و عمق آن است. در نظر گرفتن نسبت پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار برای راستای X به شدت حجم محاسبات را بالا برد. این در حالی است که نسبت‌های پیشنهاد شده در پژوهش حاضر حجم محاسبات را ۱۲ برابر کم‌تر کرد، بدون این که تأثیر قابل توجهی در دقت نتایج داشته باشد. شایان ذکر است که نسبت‌های مذکور برای مدل‌سازی‌های عددی صورت‌گرفته با اضافه کردن سازه کف‌بند تغییراتی داشت. بدین معنی که باتوجه به این که تمرکز اصلی مطالعه حاضر بر آبستتگی پائین‌دست کف‌بند بود، در محدوده کف‌بند و پائین‌دست آن از شبکه‌بندی‌های ریزتری استفاده شد؛ بنابراین در محدوده مورد مطالعه عدد ۶/۰۴ ذکر شده به ۱/۵ محدود شد. همچنین در این مرحله مقایسه‌ای بین نسبت تنش برشی بستر به میانگین تنش برشی بستر ($\tau_b/\bar{\tau}_b$) اندازه‌گیری شده در کار آزمایشگاهی و به دست آمده از مدل عددی حاضر با استفاده از مدل‌های آشفته‌گی مختلف صورت گرفت (شکل ۱). در شکل (۱)، y فاصله نقطه مورد نظر از دیواره کانال و B عرض کانال است.

(L) در رابطه (۲) و اصلاح آن بود. بنابراین با اصلاح تحلیل ابعادی (2012) Koochak رابطه (۳) ارائه شد:

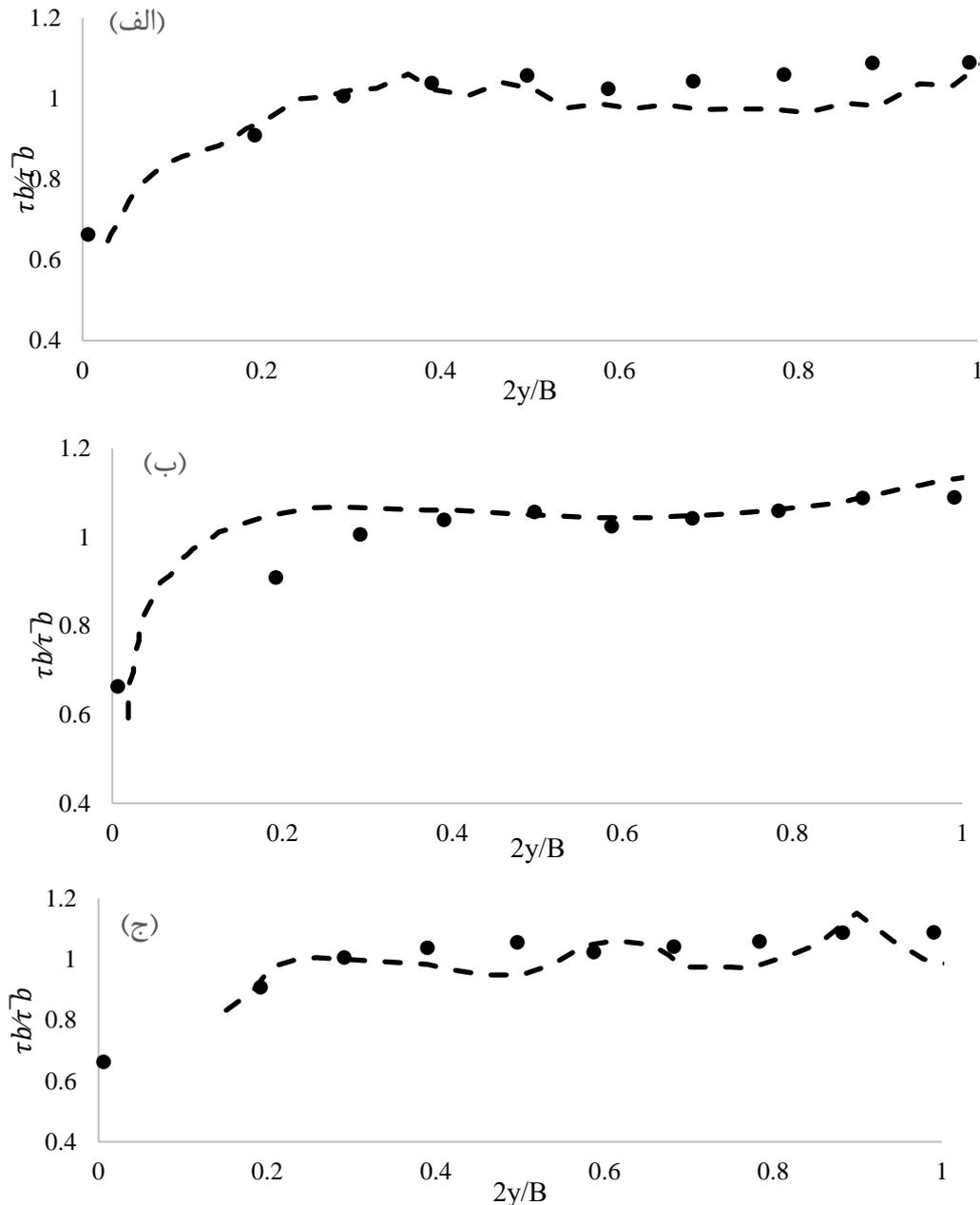
$$\frac{d_s}{\varepsilon} = f\left(d_{50}/\varepsilon, Fr^*, L/\varepsilon\right) \quad (3)$$

۲-۲- مراحل مدل‌سازی عددی

برای بررسی وضعیت آبستتگی پائین‌دست کف‌بند، پژوهش در چند مرحله صورت گرفت. در ابتدا مدل عددی نسبت به ابعاد شبکه‌بندی حساسیت‌سنجی شد. پس از آن، باتوجه به این که برای بررسی آبستتگی نیاز به تعریف یک سری ضرایب تجربی در نرم‌افزار بود، مدل عددی به‌زای مقادیر مختلف برای ضرایب مذکور واسنجی و در ادامه اعتبارسنجی شد. سپس، از مدل عددی واسنجی شده برای محاسبه بیشینه عمق آبستتگی در پائین‌دست کف‌بندها با تغییر طول آن‌ها استفاده شد. در نهایت، با استفاده از مجموع خروجی‌های به دست آمده از مدل عددی، معادله‌ای برای بیشینه عمق آبستتگی پیشنهاد شد. به منظور به دست آوردن رابطه دقیق برای تابع معرفی شده در رابطه (۳) از نرم‌افزار SPSS 26 استفاده شد. در این راستا، با ترسیم تعدادی گراف بین متغیرهای بی‌بعد تعریف شده در رابطه (۳) بصورت یک‌به‌یک، ضرایب و توان‌های بهینه مشخص و رابطه با کم‌ترین خطا به دست آمد. همچنین یکی دیگر از راه‌های پیدا کردن رابطه مناسب، معرفی سایر روابط مشابه به نرم‌افزار است. در پژوهش حاضر نیز با معرفی رابطه پیشنهاد شده در مطالعه (2012) Koochak به نرم‌افزار این روش امتحان شد. این روش منجر به بالا بردن دقت رابطه به دست آمده از روش قبل نشد.

۲-۲-۱- حساسیت‌سنجی نسبت به ابعاد شبکه‌بندی

در این مرحله از نتایج مدل آزمایشگاهی Knight et al. (1984) استفاده شد. ایشان با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های متعدد بر روی یک کانال مستطیلی با طول m ۱۵، عرض متغیر و با بستر و جداره صلب، روابط حاکم بر تعیین تنش برشی متوسط جداره و کف را پیشنهاد دادند. ایشان با استفاده از ۲۵ داده آزمایشگاهی در محدوده نسبت عرض کانال به عمق جریان (B/H) بین ۰/۳۱



شکل ۱- مقایسه نسبت تنش برشی بستر به میانگین تنش برشی بستر ($\tau_b/\bar{\tau}_b$) در عرض کانال بین مدل آزمایشگاهی Knight et al. (1984) (دایره) و مدل عددی حاضر (خط چین) با استفاده از مدل آشفتگی: الف- $k-\omega$ ، ب- $k-\epsilon$ و ج- RNG

Fig. 1 Comparing the ratio of bed shear stress to average bed shear stress ($\tau_b/\bar{\tau}_b$) across the channel between the laboratory model of Knight et al. (1984) (circle) and the current numerical model (dashed line) using the turbulence model a) $k-\omega$, b) $k-\epsilon$ and c) RNG

مدل $k-\epsilon$ در محاسبه تنش‌های برشی به صورت متقارن بود. از طرفی مدل $k-\epsilon$ مقادیر مربوط به تنش برشی در نقاط نزدیک به محور مرکزی که بیشینه تنش برشی اتفاق می‌افتد، را با دقت بالاتری محاسبه کرد. از این رو برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل $k-\epsilon$ استفاده شد. در مرحله اعتبارسنجی، مقایسه نتایج

محاسبه خطای ریشه میانگین مربعات، میانگین خطای مطلق و ضریب همبستگی برای سه مدل آشفتگی نشان داد که مدل $k-\epsilon$ با مقادیر به ترتیب 0.062 ، 0.066 و 0.04 عملکرد نسبتاً بهتری را در مقایسه با دو مدل دیگر دارد. همچنین مقایسه کیفی نتایج به دست آمده از سه مدل حاکی از توانایی بالاتر

شایان ذکر است که به منظور اعتبارسنجی مدل عددی مقادیر به دست آمده از واسنجی برای آزمایش‌های ۱۵، ۱۸ و ۲۱ تکرار شد که منجر به بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب برابر ۳۷/۵، ۳۴/۳ و ۳۱/۵ mm شد که در مقایسه با مقادیر معادل در جدول (۱)، قابل قبول است.

تاکنون تمامی شبیه‌سازی‌های عددی مربوط به واسنجی مدل عددی بر اساس آزمایش‌ها با دانه‌بندی به قطر ۱/۴ mm بودند. جدول (۴) نشان می‌دهد که استفاده از متغیرهای واسنجی شده برای آزمایش شماره ۵ (Koochak (2012) با دانه‌بندی به قطر ۰/۸ mm منجر به نتایج بادقت کافی نشد. از آنجا که ضریب زبری بستر (k_s) متغیری است که دانه‌بندی در آن نقش مهمی را ایفا می‌کند، برای بهبود نتایج صرفاً بر روی همین متغیر تمرکز شد. در نظر گرفتن مقدار ۱۰ برای این متغیر نتایج مطلوبی را به دنبال داشت (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج مدل عددی مربوط به آزمایش شماره ۵ (Koochak (2012) با واسنجی مجدد k_s

Table 4 The results of the numerical model related to experiment No. 5 of Koochak (2012) by recalibrating k_s

θ_{cr}	C_{max}	k_s	Ec	BDL	ϕ (Degrees)	LoA	Time (s)	$ds-N$ (mm)	$ds-E$ (mm)
Soulsby- Whitehouse Equation	0.45	6	0.018	13	32	No	20	28.10	35
Soulsby- Whitehouse Equation	0.45	10	0.018	13	32	No	20	35.09	

استفاده از نتایج مدل عددی حاضر رابطه‌ای برای بیشینه عمق آبشستگی پائین دست ارائه می‌شود. در این مرحله از مدل $k-\epsilon$ برای مدل سازی آشفستگی استفاده شد. همچنین مقادیر C_{max} ، Ec ، BDL و ϕ ، به ترتیب، ۰/۴۵، ۰/۱۸، ۰/۱۳ و ۳۲۰ انتخاب شد. برای محاسبه θ_{cr} نیز از معادله سلسبی - وایت هاوس استفاده شد. روش به دست آوردن هریک از این موارد در بخش قبل توضیح داده شد.

۳-۱- تأثیر طول کفبند بر آبشستگی پائین دست آن

در مطالعه فیزیکی (Koochak (2012)، همگی آزمایش‌ها برای کفبند با طول ۰/۷۳ m انجام شد. در این مرحله تأثیر طول کفبند بر بیشینه عمق آبشستگی در پائین دست آن به صورت عددی بررسی شد. بدین منظور از کفبند با طول‌های ۲ و ۲/۵ m استفاده شد. جدول (۵) بیشینه عمق آبشستگی محاسبه شده در این بررسی را نشان می‌دهد. در هر ردیف از

(2008). همان گونه که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود در نظر گرفتن عدد صفر برای Ec (کمینه مقدار قابل تعریف برای این متغیر) و همچنین تغییر ϕ منجر به تفاوت محسوسی در $ds-N$ نشد. از طرفی در نظر گرفتن اصلاحات پیشنهاد شده در پژوهش (Van Rijn (2008) برای متغیر شیلدز بحرانی (θ_{cr}) تعریف شده در پژوهش (Shields (1936) و همچنین در نظر گرفتن عدد ۵ برای BDL منجر به تفاوت بیش تری بین مقادیر فیزیکی و عددی شد. بنابراین برای Ec ، ϕ و LoA از مقادیر و تنظیمات پیش فرض نرم افزار استفاده شد. در نهایت، در نظر گرفتن مقدار ۰/۴۵ برای C_{max} ، عدد ۶ برای k_s و عدد ۱۳ برای BDL و همچنین محاسبه θ_{cr} با استفاده از معادله سلسبی - وایت هاوس در مرحله واسنجی منجر به بیشینه عمق آبشستگی معادل ۲۷/۶ mm شد. این عدد به مقدار به دست آمده در مشاهده آزمایشگاهی (۲۹ mm) نزدیک است.

هم چنین برای اعتبارسنجی مدل عددی، واسنجی صورت گرفته در جدول (۴) برای آزمایش‌های ۲، ۸ و ۱۱ تکرار شد که منجر به عمق آبشستگی به ترتیب برابر ۴۰/۷، ۲۸/۴ و ۲۸/۲ mm شد. این مقادیر در مقایسه با مقادیر معادل در جدول (۱)، قابل قبول است. شایان ذکر است که اعداد فرود ذره برای آزمایش‌های ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴، که در قسمت قبل برای واسنجی استفاده شدند، در حدود ۳ و برای آزمایش‌های ۲، ۵، ۸ و ۱۱ در حدود ۳/۳ است (جدول ۱). در واقع انتخاب آزمایش‌ها به گونه‌ای بود که تأثیر زبری کفبند، دانه‌بندی بستر و عدد فرود ذره در واسنجی بررسی شد.

۳- یافته‌ها و بحث

در این بخش تأثیر طول کفبند بر بیشینه عمق آبشستگی پائین دست آن به صورت عددی بررسی می‌شود. همچنین با

آبشستگی، کاهش می‌یابد. به‌طور مثال عمق آبشستگی برای آزمایش شماره ۲ با افزایش طول کفبند از ۰/۷۳ به ۲/۵ m از ۴۰/۷ به ۳۰/۱۴ mm (یعنی ۱۰/۵۶ mm) کاهش یافت، در حالی که این تغییرات برای آزمایش شماره ۱۱، به ترتیب، از ۲۸/۲ به ۲۵/۱۴ mm (یعنی ۳/۰۶ mm) بود. همچنین نتایج عددی نشان داد که با افزایش قطر دانه‌بندی تأثیر ذکر شده کم‌تر شد، به طوری که اختلاف عمق مذکور برای آزمایش شماره ۱۸، ۶/۱۱ mm و برای آزمایش شماره ۲۴، ۴/۷۳ mm بود. این نتایج با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش Hamidifar et al. (2011) که آبشستگی را در پائین‌دست کفبند صلب با تغییر در دانه‌بندی بستر فرسایش‌پذیر پائین‌دست آن با استفاده از یک مدل فیزیکی بررسی کردند، قابل مقایسه است. بدین ترتیب که در مطالعه ایشان نیز با افزایش قطر دانه‌بندی و در نتیجه ضریب زبری مؤثر پائین‌دست آن، بیشینه عمق آبشستگی کاهش یافت. روند ذکر شده در کار ایشان و مشاهده شده در مدل عددی حاضر نیز درست است. بدین معنی که بدیهی است که با افزایش قطر دانه‌بندی پائین‌دست کفبند در شرایط یکسان برای جریان، با توجه به سنگین‌تر شدن دانه‌ها، احتمال جابه‌جایی و انتقال آن‌ها به نقاط پائین‌دست کاهش می‌یابد.

۳-۲- معادله اصلاح‌شده بیشینه عمق آبشستگی

به‌منظور استخراج معادله مربوط به تابع تعریف‌شده در رابطه (۳) از کلیه خروجی‌های مدل عددی پس از واسنجی و همچنین خروجی‌های مربوط به تأثیر تغییر طول کفبند (جدول ۵) استفاده شد. در این راستا از نرم‌افزار آماری SPSS 26 استفاده و رابطه (۴) با $R^2=0.94$ و $RMSE=0.86$ استخراج شد:

$$d_s/\varepsilon = Fr^{*6.7} \times (D_{50}/\varepsilon)^{1.25} \times (L/\varepsilon)^{-0.16} \times 0.045 \quad (4)$$

قابل‌قبولی را نشان داد (شکل ۲). با توجه به شکل (۲)، رابطه (۴) می‌تواند بیش از ۸۰٪ مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مدل فیزیکی (Koochak 2012) را در محدوده خطای کم‌تر از ۲۰٪ محاسبه نماید.

جدول (۵) همگی شرایط در نظر گرفته‌شده برای مدل عددی مشابه شرایط آزمایش مرتبط ذکر شده در همان ردیف است و صرفاً طول کفبند تغییر داده شد. مشخصات آزمایش‌های ذکر شده در ستون اول جدول (۵) در جدول (۱) ذکر شده است.

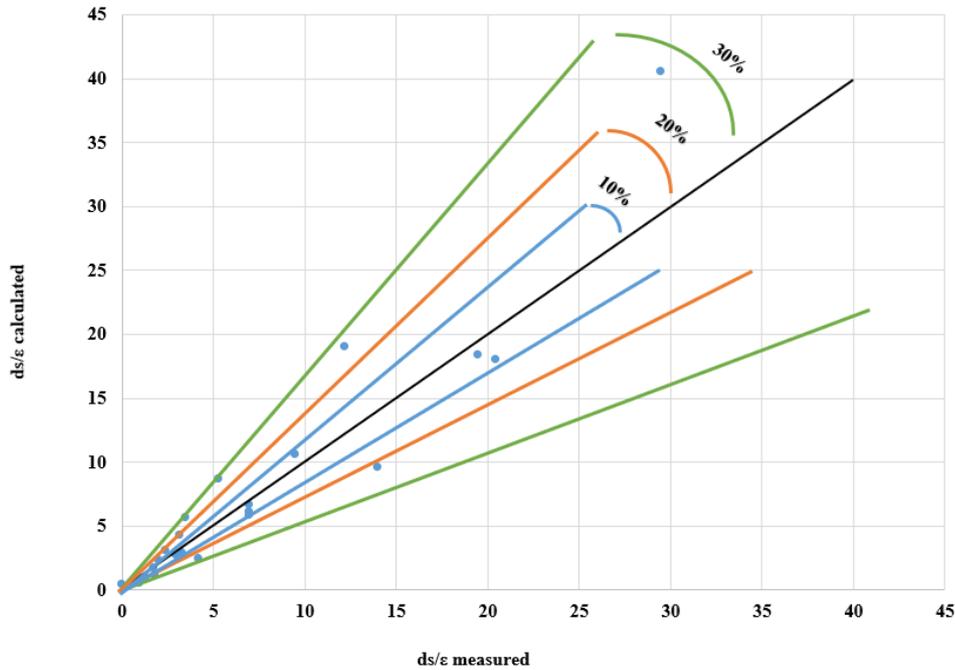
جدول ۵ بیشینه عمق آبشستگی محاسبه‌شده به‌وسیله مدل عددی حاضر در پائین‌دست کفبندها با طول متفاوت

Table 5 The maximum scour depth calculated by the present numerical model downstream of aprons with different lengths

Experiment No	Apron length in related	Apron length in	$ds-N$ (mm)
2	0.73	2	34.31
2	0.73	2.5	30.14
5	0.73	2	27.26
5	0.73	2.5	25.88
8	0.73	2	24.81
8	0.73	2.5	24.60
11	0.73	2.5	25.14
15	0.73	2	35.59
18	0.73	2.5	28.19
21	0.73	2.5	26.05
24	0.73	2	25.35
24	0.73	2.5	24.27

مقایسه نتایج ذکر شده در جدول (۵) با مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول (۱) نشان داد که طول کفبند بر روی بیشینه عمق آبشستگی رخ داده در پائین‌دست آن تأثیر گذار است و افزایش این طول منجر به کاهش این عمق می‌شود. از آن‌جاکه در تمامی موارد مدل‌شده زبری کفبند بیش از زبری بستر در نظر گرفته‌شد، روند مذکور درست است. از این‌رو که افزایش طول کفبند به معنی استهلاک بیش‌تر انرژی جریان در طول کفبند و کاهش توان آن برای فرسایش بستر پائین‌دست است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش نسبت زبری کفبند به زبری بستر تأثیر افزایش طول کفبند بر کاهش عمق

در نهایت جهت بررسی دقت رابطه (۴)، مشخصات تعریف‌شده در ستون‌های دوم تا چهارم جدول (۱) در رابطه قرار داده‌شد و مقادیر به‌دست آمده از رابطه برای بیشینه عمق آبشستگی (d_s) با مقادیر متناظر در آخرین ستون جدول (۱) مقایسه شد. این مقایسه دقت



شکل ۲- نمودار مقایسه مقادیر $\frac{d_s}{\epsilon}$ محاسبه شده در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در مدل فیزیکی Koochak (2012)
 Fig. 2 Comparison graph of $\frac{d_s}{\epsilon}$ values calculated vs the values measured in the physical model of Koochak (2012)

می توان مقدار عمق جریان مورد نظر را بدون این که بستر فرسایش پذیر تحت تأثیر قرار بگیرد، وارد کرد. بدین ترتیب با استفاده از یک مدل عددی اعتبارسنجی شده مانند مدل حاضر شرایط بهتری برای رسیدن به نتایج دقیق تر فراهم است.

روابط تجربی موجود برای پیش بینی بیشینه عمق آبشستگی اغلب در اطراف پایه پل و تحت تأثیر جت دیواره استخراج شده اند (Chavan and Kumar 2018; Keshavarzi et al. 2018; Aamir and Ahmad et al. 2018; Pandey et al. 2018) (2019) عملکرد روابط موجود را با استفاده از داده های آزمایشگاهی موجود مربوط به آبشستگی پائین دست کفبند مقایسه کردند. ایشان نتیجه گرفتند که رابطه پیشنهادی Dey and Sarkar (2006) بهتر از سایر روابط در این زمینه است. نقطه ضعف رابطه Dey and Sarkar (2006) این است که در آن زبری کفبند در نظر گرفته نشده است، این در حالی است که در رابطه (۴) زبری کفبند تأثیر داده شده است. همچنین Aamir et al. (2022) با در نظر گرفتن ضعف رابطه Dey and Sarkar (2006)، یک رابطه مبتنی بر همبستگی ارائه دادند. اگرچه در رابطه Aamir et al. (2022) زبری کفبند

مقایسه صورت گرفته در شکل (۲) نشان داد که رابطه (۴) می تواند با و بدون حذف شش داده پرت، مقادیر آزمایشگاهی را با خطای ریشه میانگین مربعات، به ترتیب، 0.1859 و $1/3$ پیش بینی کند. همچنین این عدد با معیار قرار دادن میانگین درصد خطای مطلق، به ترتیب برابر 0.109 و 0.25 است.

باید توجه داشت که بخشی از خطا معمولاً خطای آزمایشگاهی است. بدین معنی که نمی توان گفت که داده های به دست آمده از آزمایشگاه قطعی و دقیق هستند و احتمالاً هم خطای انسانی و هم خطای ابزار اندازه گیری در نتایج به دست آمده در آزمایشگاه تأثیرگذار است. بخشی از خطا نیز مربوط به شیوه مدل سازی فیزیکی و تشریح ناقص آن در پژوهش ها است. به عنوان مثال در پژوهش Koochak (2012) برای پیشگیری از آبشستگی ناگهانی پائین دست کفبند، دبی به تدریج اضافه شد، ولی در مورد نرخ افزایش دبی اطلاعاتی ارائه نشد. حذف داده های پرت به قضاوت بهتر در این زمینه کمک می کند. این در حالی است که از مزایای استفاده از مدل های عددی وجود راهکارهای متعدد در موارد این چنینی است. به عنوان مثال در نرم افزار FLOW-3D از همان ابتدا در بخش مقدار اولیه^۱

¹Initial

۳- معادله پیشنهادی می تواند بیش از ۸۰٪ مقادیر آزمایشگاهی مربوط به بیشینه عمق آبستگي را با خطای کم تر از ۲۰٪ پیش بینی کند.

۴- طول کفبند بر روی بیشینه عمق آبستگي رخ داده در پائین دست آن تأثیرگذار و افزایش آن منجر به کاهش عمق آبستگي شد. همچنین با افزایش نسبت زبری کفبند به زبری بستر تأثیر افزایش طول کفبند بر کاهش عمق آبستگي، کاهش یافت. با افزایش قطر دانه بندی این تأثیر کم تر شد.

تفاوت مدل فیزیکی در نظر گرفته شده برای اعتبارسنجی نتایج عددی مربوط به آبستگي نسبت به مدل های مشابه، عدم وجود گردابه ها و تلاطم شدید آب در اثر وجود پرش هیدرولیکی و یا جت خروجی آب بود. به همین دلیل مدل فیزیکی مورد استفاده جز مطالعات پایه در این زمینه تلقی می شود. از این رو تکرار مدل سازی فیزیکی مذکور با هدف تکمیل آن پیشنهاد می شود. تغییر عمق پایاب و ذکر دقیق مقادیر آن، همچنین تکرار آزمایش ها برای تعداد بیشتری دانه بندی و در نظر گرفتن تأثیر غیریکنواختی دانه ها در آن و در نهایت واسنجی مجدد مدل عددی حاضر بر اساس داده های آزمایشگاهی جدید از جمله مهم ترین این پیشنهادهاست.

دسترسی به داده ها

داده های استفاده شده (یا تولید شده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که، هیچ گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Aamir, M. and Ahmad, Z. (2019). Estimation of maximum scour depth downstream of an apron under submerged wall jets. *J. Hydroinform.*, 21, 523–540. DOI: [10.2166/hydro.2019.008](https://doi.org/10.2166/hydro.2019.008)
- Aamir, M., Ahmad, Z., Pandey, M., Khan, M. A., Aldrees, A., & Mohamed, A. (2022). The effect of rough rigid apron on scour downstream of sluice gates. *Water*, 14, 2223. DOI: [10.3390/w14142223](https://doi.org/10.3390/w14142223)
- Anonymous (2014). FLOW-3D Version 11.04 User's Manual. *Flow Science Inc.* Available

نیز در نظر گرفته شد، ولی این رابطه برای آبستگي تحت تأثیر جت دیواره ارائه شد. این در حالی است که همان طور که قبلاً ذکر شد رابطه (۴) در حالت عدم وجود گردابه ها و یا آشفستگی شدید جریان تحت تأثیر پرش هیدرولیکی و یا جت خروجی آب استخراج شد و از این نظر جز روابط پایه در این زمینه محسوب می شود.

۴- نتیجه گیری

یکی از اهداف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر اختلاف زبری کفبند و مصالح بستر، عدد فرود ذره و دانه بندی بر آبستگي پائین دست کفبند با استفاده از یک مدل عددی با به کارگیری نرم افزار FLOW-3D بود. همچنین در این پژوهش تأثیر طول کفبند بر بیشینه عمق آبستگي پائین دست آن بررسی شد. بدین منظور مدل عددی حاضر با استفاده از کارهای آزمایشگاهی مشابه واسنجی شد. در ادامه، با مبنا قراردادن یکی از مدل های آزمایشگاهی پایه، نتایج برای کفبند با طول هایی متفاوت از مدل فیزیکی به دست آمد. یک معادله برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي پائین دست کفبند پیشنهاد شد. در ادامه مهم ترین یافته های به دست آمده از مدل حاضر بیان می شود:

۱- بهترین معیار برای تعریف عدد شیلدز بحرانی استفاده از معادله سلسبی - وایت هاوس است و نیازی به در نظر گرفتن اصلاحات مربوط به تغییرات شیب بستر وجود ندارد.

۲- با در نظر گرفتن مقادیر BDL ، Ec ، C_{max} و ϕ به ترتیب برابر با ۰/۴۵، ۰/۱۸، ۱۳ و ۳۲° نزدیک ترین و مناسب ترین مقادیر به مقادیر آزمایشگاهی برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي به دست آمد.

on: <https://www.flow3d.com>.

- Basiouny, M. E., Nasrallah, T. H., Abdelhaleem, F. S. F., & Ibraheem, A.S. (2018). Roughened and corrugated aprons as scour countermeasure downstream of submerged hydraulic jump. In *Proc., 2018 21st Int. Water Technol. Con., IWTC21* (pp. 200–214). Port Said, Egypt.
- Chavan, R., & Kumar, B. (2018). Prediction of scour depth and dune morphology around circular bridge piers in seepage affected alluvial channels. *Environ. Fluid Mech*, 18,

- 923–945. DOI: [10.1007/s10652-018-9574-z](https://doi.org/10.1007/s10652-018-9574-z)
- Dey, S., & Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *J. Hydraul. Eng.*, 132, 246–257. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:3\(246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:3(246))
- Espa, P. and Sibilla, S. (2014). Experimental study of the scour regimes downstream of an apron for intermediate tailwater depth conditions. *J. Appl. Fluid Mech.*, 7, 611–624. DOI: [10.36884/jafm.7.04.21238](https://doi.org/10.36884/jafm.7.04.21238)
- Farrahi-Moghaddam, K. (2018). *Numerical simulation of fluid-solid flows in open channels using an Euler-Euler Two-Phase model*. University of Tehran (Iran). [In Persian]
- Hamidifar, H., Nasrabadi, M. and Omid, M. H. (2018). Using a bed sill as a scour countermeasure downstream of an apron. *Ain Shams Eng. J.*, 9, 1663–1669. DOI: [10.1016/j.asej.2016.08.016](https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.08.016)
- Hamidifar, H. and Omid, M. H. (2010). Noncohesive sediment scour downstream of an apron. *J. Agric. Eng. Res.*, 11, 17–28. DOI: [20.1001.1.26454531.1389.11.2.2.3](https://doi.org/10.1001.1.26454531.1389.11.2.2.3)
- Hamidifar, H., Omid, M. H. and Nasrabadi, M. (2011). Scour downstream of a rough rigid apron. *World Appl. Sci. J.* 14(8), 1169-1178.
- Homaei, F. and Najafzadeh, M. (2022). Failure analysis of scouring at pile groups exposed to steady-state flow: On the assessment of reliability-based probabilistic methodology. *Ocean Eng.* 266, 112707. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2022.112707](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112707)
- Keshavarzi, A., Shrestha, C. K., Melville, B., Khabbaz, H., Ranjbar-Zahedani, M. and Ball, J. (2018). Estimation of maximum scour depths at upstream of front and rear piers for two in-line circular columns. *Environ. Fluid Mech.* 18, 537–550. DOI: [10.1007/s10652-017-9572-6](https://doi.org/10.1007/s10652-017-9572-6)
- Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E. (1984). Boundary shear in smooth rectangular channels. *J. Hydraul. Eng.*, 110, 405–422. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:4(405))
- Koochak, P. (2012). *Laboratory Investigation of the Effect of Roughness Height of Horizontal Apron on Downstream Scour*. Shahid Chamran University of Ahvaz (Iran). [In Persian]
- Kumar, B. and Ahmad, Z. (2022). Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 148(1), 4021066. DOI: [10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647)
- Merritt, W. S., Letcher, R. A. and Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environ. Model. & Softw.*, 18, 761–799. DOI: [10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Mobayen, R., Najafzadeh, M. and Farrahi-Moghaddam, K. (2023). Evaluation of regression-based soft computing techniques for estimating energy loss in gabion spillways. *Environ. Water Eng.*, 9, 241–255. DOI: [10.22034/ewe.2022.329153.1724](https://doi.org/10.22034/ewe.2022.329153.1724)
- Moghadam, K. F., Banihashemi, M. A., Badiei, P. and Shirkavand, A. (2020). A time-splitting pressure-correction projection method for complete two-fluid modeling of a local scour hole. *Int. J. Sediment Res.*, 35, 395–407. DOI: [10.1016/j.ijsrc.2020.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.02.004)
- Moghadam, K. F., Banihashemi, M. A., Badiei, P. and Shirkavand, A. (2019). A numerical approach to solve fluid-solid two-phase flows using time splitting projection method with a pressure correction technique. *Prog. Comput. Fluid Dyn. an Int. J.*, 19, 357–367. DOI: [10.1504/PCFD.2019.103260](https://doi.org/10.1504/PCFD.2019.103260)
- Pandey, M., Sharma, P. K., Ahmad, Z. and Singh, U. K. (2018). Experimental investigation of clear-water temporal scour variation around bridge pier in gravel. *Environ. Fluid Mech.* 18, 871–890. DOI: [10.1007/s10652-017-9570-8](https://doi.org/10.1007/s10652-017-9570-8)
- Samma, H., Rostam-Abadi, M., Khosrojerdi, A. and Mehraein, M. (2022). Investigation of scour mechanism due to simultaneous operations of submerged wall and impinging jets using Flow-3D model,” *Water Soil Sci.*, 32(2), 11–24. DOI: [10.22034/ws.2021.41371.2370](https://doi.org/10.22034/ws.2021.41371.2370)
- Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. Soil Conservation Service Publications, California. 47 pp.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands: A manual for practical applications*, Ch. 9:

- Bedload transport*. Thomas Telford Publications. London. 249 pp.
- Van Rijn, L. C. (2008). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries, coastal seas and oceans*. Aqua Publications. Netherlands. 1200 pp.
- Varaki, M. E., Sedaghati, M. and Sabet, B. S. (2022). Effect of apron length on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *Arab. J. Geosci.*, 15(14), 1240. DOI: [10.1007/s12517-022-10522-7](https://doi.org/10.1007/s12517-022-10522-7)