



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Numerical Investigation of the Performance of Blade Groynes on Scouring and its Effect on Hydraulic Parameters of Sediment and Flow

Kiyoumars Roushangar^{1*}, Sepehr Goodarzi² and Hamidreza Abbaszadeh³

¹Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Ph.D. Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Article information

Received: March 08, 2023
Revised: April 05, 2023
Accepted: April 15, 2023

Keywords:

Erosion
 Groyne
 Sedimentation
 Scouring
 VOF

*Corresponding author:
roshangari@tabrizu.ac.ir



Abstract

One of the significant issues in hydraulic engineering is reducing erosion in rivers by using groynes to preserve soil. The purpose of this study is to investigate numerically the groynes' presence on the sedimentary flow parameters using FLOW-3D software. For this purpose, groynes were examined at angles 30°, 60°, and 90° under 10 scenarios in various discharge and hydraulic conditions. Here, the mesh block with dimensions of 5 mm was chosen as the optimal mesh block for simulating models. In addition, Large Eddy Simulation (LES) turbulence model was used for simulations. In the scenarios where two blades are used scouring is observed in the first blade, while the sedimentation phenomenon was observed in the groyne after the first groyne in the direction of the flow. In the two blades with a distance of 0.60 m from each other, 48 mm erosion occurred. The highest amount of scour is related to the arched groyne (I-Left-Q285) with 45 mm. Discharges have an increased effect on scouring, so by comparing the scenarios with one groyne (I-Q285, I-Q200, and I-Q350), the lowest amount is with the value of 5.5mm corresponding to I-Q200. The insufficient erosion in the angled groynes corresponds to the smaller angle scenario.

How to cite this paper: Roushangar, K., Goodarzi, S. and Abbaszadeh, H. (2024). Numerical investigation of the performance of blade groynes on scouring and its effect on hydraulic parameters of sediment and flow. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 121-136. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381628.1838> (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

The spreading of the river water to the sides of the river and the washing of the walls inward causes the water to expand on the river's surface. It destroys the walls and wastes of river water. In addition, the depth of the river decreases. This issue leads to problems such as the loss of aquatic life and disturbance in the movement of floating vehicles on the river and causing damage to devices such as turbines. This issue is especially significant in low-water seasons and dry areas. This problem can be compensated and prevented by some structures. The groynes structures are used to deepen rivers and prevent the destruction of riverbanks, which is sometimes dangerous in sensitive areas. Groynes are structures perpendicular to the river wall that reduce the flow velocity depending on their type and placement angle. On the other hand, these structures direct the flow to the inside of the river. Since the lands around the rivers have special agricultural importance, the restoration of these lands by preventing water from advancing to the sides due to the destruction of the walls is another reason for using groynes. In the current research, the factors affecting scouring around the groyne structure in submerged conditions were investigated so that the performance of different types of groynes according to various geometric and hydraulic conditions would be discussed and examined more closely. For this purpose, in this research, using the FLOW-3D numerical model, various types of blade groynes have been modeled under different scenarios in single and double modes at different angles and positions in the flow path

with var hydraulic and geometric characteristics in order to improve the efficiency of groynes.

Material and Methods

To select the optimal mesh, simulations were first performed with large mesh dimensions; then in the next steps, simulations were performed with smaller mesh dimensions than the previous step in order to obtain acceptable results. Here, the optimal mesh was selected by performing simulation in 5 modes, with different mesh dimensions. Since in the mesh with the dimensions of 4.5 and 5 mm, the simulation results were very close to each other and had similar results in the velocity contours and sedimentation rate; therefore, the mesh with the dimensions of 5 mm was chosen for the simulation of other models. In selecting the boundary conditions, the volume flow rate has been used for the inlet and the outflow condition has been selected at the end of the channel. Also, for the walls and bottom, and upper surface, wall and symmetry boundary conditions are chosen, respectively. In this research, the LES turbulence model was chosen for the simulations. Among the reasons for choosing this model, we can mention things such as reliability in answering various problems, accurate solution of equations, and high accuracy in showing details of the flow and review of previous studies. In the definition of the initial conditions, the pressure distribution is defined as hydrostatic. A duration of 500 s was considered for the simulation. The research was investigated in the discharges of 20, 28.5 and 35 l/s with 10 scenarios. In addition, the sediment properties of sand were with a diameter of 0.001 m, density of 2650 kg/m³ and thicknesses of 0.06 m (Table 1).

Table 1 The examined scenarios

No.	Scenario Name	Geometric Conditions	Q (l/s)
1	T-Q285	1 T-shaped groyne	28.5
2	I-Q285	1 I-shaped groyne	28.5
3	LRight-Q285	1 L-shaped groyne	28.5
4	LLeft-Q285	1 L-shaped groyne	28.5
5	I30-Q285	1 I-shaped groyne with an angle of 30°	28.5
6	I60-Q285	1 I-shaped groyne with an angle of 60°	28.5
7	DI80-Q285	2 I-shaped groynes with a distance of 0.80 m from each other	28.5
8	DI60-Q285	2 I-shaped groynes with a distance of 0.60 m from each other	28.5
9	I-Q200	1 I-shaped groyne	20
10	I-Q350	1 I-shaped groyne	35

Results

In Table (2) by examining the results obtained from the modeled scenarios, the highest scouring is related to the single scenario with arc mode (LLeft-Q285) by 45 mm. It shows the effect of the operation of opposite blades in the flow direction. In other words, if the shape of the blade is not in accordance with the direction of the flow, more erosion will occur in its vicinity. By comparing I-Q285, DI60-Q285, and DI80-Q285 scenarios, we can see the highest scour rate for DI60-Q285 and then the DI80-Q285 scenarios. Discharge changes have a high effect on scouring, so by comparing the single mode scenarios such as I-Q285, I-Q200, and I-Q350, the lowest amount with the value of 5.5 mm is related to the I-Q200 scenario. Therefore, with the increase in the discharge, the scouring rate increases. In addition to the local

scouring that occurred in the vicinity of the blade, knowing the amount of sediment removed from the channel also provides valuable information. For this purpose, the changes in the volume of sediment on the bottom of the channel after the completion of the simulation have been calculated. Among the 10 mentioned scenarios, the highest amount of sediment removed is related to the DI80-Q285 scenario, in this scenario due to the presence of two blades in the channel, the eddies between them lead to high erosion of the bed. So that in the two blades with distance of 0.60 m from each other, 48 mm erosion has been occurred. In contrast, I30-Q285 and I-Q200 scenarios have the lowest amount of erosion, which for the first case is due to the direction of the blade flow. In addition, for the second case, the root is in the reduction of the inlet discharge.

Table 2 General results of the examined scenarios

Scenario No.	Scenario Name	Erosion of the Channel Bottom (cm ³)	Maximum Dune Height (mm)	Maximum Scouring Depth (mm)
1	T-Q285	5780	14	36
2	I-Q285	1320	13	11
3	LRight-Q285	2340	22	20
4	LLeft-Q285	5670	45	45
5	I30-Q285	1010	14	12
6	I60-Q285	1260	26	16
7	DI80-Q285	6210	22	24
8	DI60-Q285	5750	12	48
9	I-Q200	810	6	5.5
10	I-Q350	2520	6	23

Conclusions

The range of scours generally occurred near the blade. The eddy current in the area of the blades has created dunes with a height proportional to the scour depth in its vicinity. In the scenarios where the angular mode of the blade is used, in the upper wall, repeated scours and dunes can be seen, which is the reason for the change of the flow gradient towards the upper wall. In the scenarios where two blades are used, severe scouring occurs in the first blade, while sedimentation phenomenon is observed in the second groyne. By comparing the first to the fourth scenario, it can be seen that the lowest amount of erosion is for the I-shaped groyne, while the highest amount of erosion is related to the T-shaped groyne. In

addition to the mentioned case, the maximum scour depth is related to the L-shaped groyne. Among the scenarios in which the two groynes are used, the amount of erosion for the case where the distance between the two groynes is 0.60 m has been assigned a lower value.

Data Availability

The data can be sent by the corresponding author via email.

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

بررسی عددی عملکرد آبشکن‌های تیغه‌ای بر آبشستگی و تأثیر آن بر پارامترهای هیدرولیکی رسوب و جریان

کیومرث روشنگر^{۱*}، سپهر گودرزی^۲ و حمیدرضا عباس‌زاده^۳

^۱استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۲/۱۷]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۱/۱۶]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۱/۲۶]

واژه‌های کلیدی:

آبشستگی

آبشکن

رسوب‌گذاری

فرسایش

VOF

*نویسنده مسئول:

roshangari@tabrizu.ac.ir

یکی از مسائل مهم در مهندسی هیدرولیک کاهش میزان فرسایش در رودخانه‌ها با استفاده از آبشکن‌ها به منظور حفظ خاک است. هدف از پژوهش حاضر بررسی عددی تأثیر وجود آبشکن بر پارامترهای رسوبی جریان با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D است. بدین منظور آبشکن‌ها در زوایای 30° ، 60° و 90° تحت ۱۰ سناریوی مختلف در دبی و شرایط هیدرولیکی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش حاضر شبکه‌بندی با ابعاد 5 mm به عنوان شبکه بهینه برای شبیه‌سازی مدل‌ها انتخاب شد. همچنین مدل آشفتگی LES (شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ) برای شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در سناریوهایی که از دو عدد تیغه استفاده شده است، در تیغه اول آبشستگی مشاهده می‌گردد درحالی‌که در آبشکن بعد از آبشکن اول در جهت جریان، پدیده رسوب‌گذاری رؤیت شد. به‌طوری‌که در سناریوی دو تیغه‌ای با فاصله 0.6 m از هم، 48 mm فرسایش رخ داد. بیشترین میزان آبشستگی مربوط به آبشکن با حالت قوسی (L-Left-Q285) به میزان 45 mm است. تغییرات دبی در میزان آبشستگی تأثیر بالایی دارد. به‌طوری‌که با مقایسه سناریوهای با یک آبشکن (I-Q285، I-Q200 و I-Q350) کم‌ترین میزان آن با مقدار $5/5\text{ mm}$ مربوط به I-Q200 است. بررسی نتایج نشان داد که کم‌ترین میزان فرسایش در آبشکن‌های زاویه‌دار مربوط به سناریو با زاویه کم‌تر است.

نحوه استناد به این مقاله:

روشنگر، کیومرث، گودرزی، سپهر & عباس‌زاده، حمیدرضا. (۱۴۰۳). بررسی عددی عملکرد آبشکن‌های تیغه‌ای بر آبشستگی و تأثیر آن بر پارامترهای هیدرولیکی رسوب و جریان. محیط زیست و مهندسی آب. 10 (1) 136-121

<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.388931.1851>

۱- مقدمه

پراکنده شدن آب رودخانه به طرفین رود و شسته شدن دیواره‌ها به داخل، موجب گسترش آب در بستر رودخانه می‌شود. این امر ضمن تخریب دیواره‌ها باعث هدر رفت آب رودخانه می‌گردد. همچنین با توجه به دبی مشخص رودخانه عمق مقطع رودخانه کاهش می‌یابد، این موضوع منجر به ایجاد مشکلاتی از قبیل تلف شدن آبزیان و اختلال در حرکت وسایل نقلیه شناور در سطح رودخانه و وارد آوردن خسارت به ادواتی همچون توربین‌ها می‌گردد. این مسئله به‌خصوص در فصول کم آب و مناطق خشک اهمیت خاصی به خود می‌گیرد که به‌وسیله برخی سازه‌ها قابل جبران و پیشگیری است. در علم مهندسی آب برای تعمیق رودخانه‌ها و جلوگیری از تخریب سواحل رود که بعضاً در مناطق حساس خطرآفرین است از سازه‌هایی بنام آب‌شکن استفاده می‌شود. آب‌شکن‌ها سازه‌هایی عمود بر دیواره رود هستند که بسته به نوع و زاویه‌شان از سرعت جریان آب می‌کاهند. از طرفی این سازه‌ها باعث هدایت جریان به‌طرف داخل رودخانه می‌شوند. از آنجایی که زمین‌های اطراف رودخانه‌ها دارای اهمیت کشاورزی خاصی هستند احیای این اراضی با جلوگیری از پیشروی آب به طرفین در اثر تخریب دیواره‌ها یکی دیگر از دلایل استفاده از آب‌شکن‌ها است. با انحراف جریان، کناره رودخانه در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با مرز راستای اصلاح شده به‌تدریج با ته‌نشست رسوبات توسعه می‌یابد و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در درازمدت تثبیت می‌شود؛ بنابراین باگذشت زمان، جریان در بخش میانی بازه رودخانه متمرکز می‌شود. آب‌شکن‌ها به‌منظور کنترل نرخ انتقال رسوب ساحلی، جلوگیری از فرسایش ساحل یا جلوگیری از ورود امواج و رسوب به مسیر رودخانه و کانال‌های منتهی به دریا ساخته می‌شود.

(Yazdi et al. (2010 الگوهای جریان در اطراف یک آب‌شکن منفرد با جریان سطح آزاد را با استفاده از مدل عددی فلوئنت شبیه‌سازی کردند. مقایسه سطح آزاد و سرعت مدل سه‌بعدی تطابق خوبی با نتایج تجربی به‌دست‌آمده توسط محققان دیگر نشان داد. (Abbasi et al. (2011 به بررسی عددی زاویه و هندسه آب‌شکن L شکل بر روی جریان و رژیم فرسایش در خم رودخانه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دامنه حداکثر سرعت‌ها و جریان‌های گردابی و آب‌شستگی در زاویه جان 75° به میزان حداکثر و کم‌ترین مقدار در زاویه جان 30° رخ داده

است. (Hosseini et al. (2018 عمق آب‌شستگی اطراف گروه شمع را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه بین روش‌های متفاوت شبکه عصبی، روش Bagging روش قابل اعتمادتری است. Amini and Asadi Parto (2017) الگوی جریان و مکانیسم آب‌شستگی موضعی اطراف گروه شمع‌ها با آرایش کنار هم و دو ردیف را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که این نرم‌افزار به‌خوبی اندرکنش بین گروه شمع‌ها را شبیه‌سازی نموده و عدد رینولدز و فاصله بین شمع‌ها متغیرهای اصلی در تشکیل گردابه‌ها است. Nayyer et al. (2018) تأثیر آب‌شکن‌های سری ساده، T شکل و L شکل در کانال مستقیم بر تغییرات زمانی آب‌شستگی اطراف آن‌ها بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که آب‌شکن T شکل در 10% اول مدت‌زمان آب‌شستگی به بیش از 90% آب‌شستگی تعادلی می‌رسد. برای آب‌شکن ساده و L شکل در 15% اول مدت‌زمان آب‌شستگی، این مقدار بیش از 80% است. همچنین بیشترین عمق آب‌شستگی در آب‌شکن ساده و L شکل دیده شده است. (Abbasi et al. (2018 به بررسی عددی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در اطراف آب‌شکن‌های با طول نامساوی تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در چینش آب‌شکن‌ها از بزرگ به کوچک، عمق آب‌شستگی در زاویه 45° ، 55% و در چینش کوچک به بزرگ با زاویه 135° ، این عمق 72% نسبت به آب‌شکن با طول مساوی و در حالت عمود بر ساحل کاهش دارد. (Giglou et al. (2018 به بررسی تأثیر آب‌شکن بر الگوی رسوب‌گذاری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش زاویه آب‌شکن بر طول و عرض منطقه رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد. هنگامی که زاویه آب‌شکن از 90° به 120° افزایش می‌یابد، عرض و طول منطقه ته‌نشینی به ترتیب تا حدود 72% و 92% افزایش می‌یابد. استفاده ترکیبی از آب‌شکن‌ها به‌صورت سری رویکردی است که (Nayyer et al. (2019 بررسی و تحلیل کرده‌اند. آن‌ها ترکیب LTT را به‌عنوان ترکیبی بهینه از یک سری ۳ آب‌شکن برای کاهش سرعت، تنش برشی، فشار و انرژی متلاطم معرفی کردند. (Ansary et al. (2019 به شبیه‌سازی توپوگرافی بستر و میدان جریان در اطراف موانع دو ردیف و توری سنگی در کانال

بر روی آبشکن‌های نفوذپذیر و غیرقابل نفوذپذیر انجام شده است. بنابراین در پژوهش حاضر عوامل مؤثر بر آبشستگی در اطراف سازه آبشکن در شرایط غوطه‌ور تحت سناریوهای مختلف در حالت تکی و دابل در زوایا و موقعیت‌های مختلف در مسیر جریان با مشخصات هیدرولیکی و هندسی متفاوت بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادلات پیوستگی و ناویر استوکس به‌وسیله مدل عددی FLOW-3D برای انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی حرکت سیال گسسته سازی می‌شوند. معادله پیوستگی یا بقای جرم در یک جریان سیال غیرقابل تراکم به‌صورت روابط (۱) و (۲) است (Othman Ahmed et al. 2019; Man et al. 2019):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + G_i + f_i \quad (2)$$

که، u_i مؤلفه بردار سرعت در راستای i می‌باشد. نرم‌افزار جهت تحلیل سه‌بعدی جریان، معادلات ناویر استوکس را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. معادلات در دستگاه مختصات کارتزین به‌صورت روابط (۳) تا (۶) است (Amini and Asadi Parto 2017; Daneshfaraz et al. 2021):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (6)$$

P نمایانگر فشار می‌باشند. معادلات ناویر استوکس معادلات مومنتوم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی لزج است. این معادله در حالت کلی به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود (Daneshfaraz et al. 2022):

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (7)$$

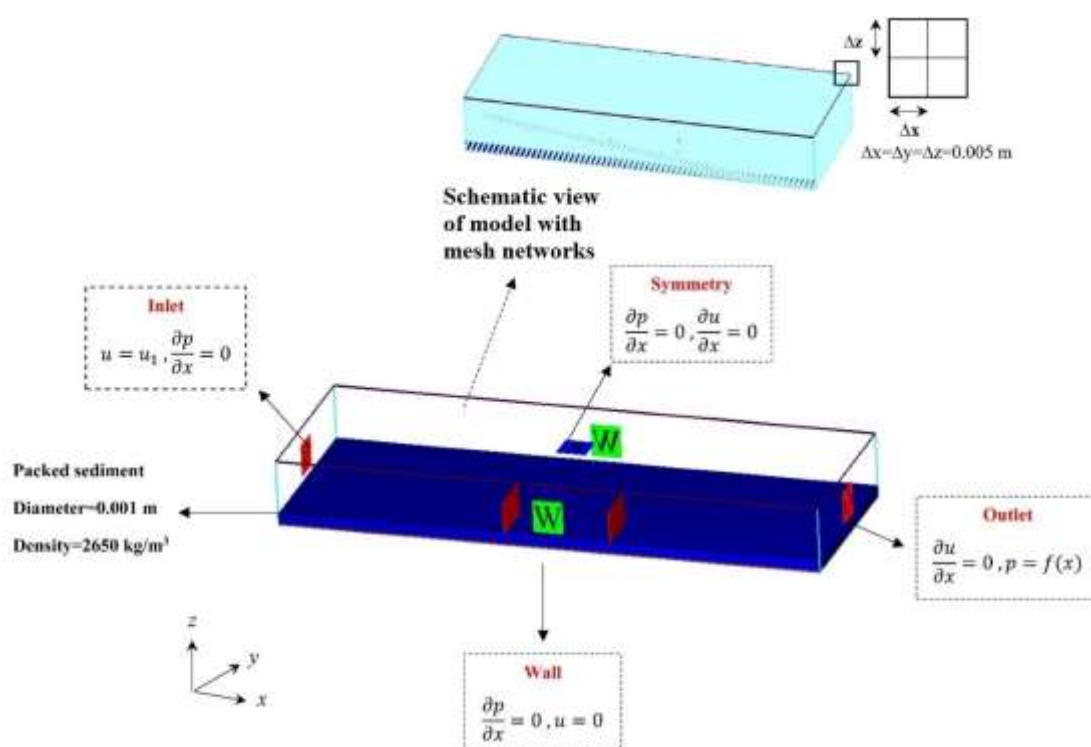
مستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله محور به محور آبشکن‌های باز دو ردیف، توانایی و دقت مدل عددی در برآورد مقدار حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. Pourshahbaz et al. (2022) مورفولوژی و هیدرودینامیک در اطراف آبشکن‌ها را بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که دقت شبیه‌سازی تحت تأثیر عدد فرود و نسبت سرعت بحرانی قرار گرفته است. دقت حداکثر عمق آبشستگی و مورفولوژی سطح در اطراف آبشکن‌ها برای شدت جریان کم‌تر از (Uave/Ucr = 0.65) دقیق‌تر بود. Alasadi et al. (2023) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در اطراف آبشکن‌های V شکل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد آبشکن‌ها و فاصله بین آن‌ها منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده و مطالعات صورت گرفته توسط محققین مختلف در زمینه بهبود کارایی انواع آبشکن‌ها به جهت کاهش از بین رفتگی ساحل رودخانه‌ها، مشاهده می‌شود که انواع شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان در هر رودخانه و همچنین مشخصات هندسی آبشکن‌های مورد استفاده اثر بسزایی در فرسایش و آبشستگی کرانه‌ها دارند. پارامترهای مختلفی مانند طول، فاصله، شکل دماغه، نوع مواد، زاویه با توجه به جهت جریان و نفوذپذیری می‌تواند در عملکرد آبشکن‌ها مؤثر باشد؛ بنابراین بحث در مورد ویژگی‌های چاله آبشستگی اطراف سازه ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر بررسی مطالعات گذشته بیانگر این است که بیشتر پژوهش‌ها،

که، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب ناشی از لزجت در جهت‌های (x, y, z) R_{SOR} منبع جرم، R_{DIF} عبارت پخش آشفته‌گی، V_F کسر حجمی سیال و

۲-۲- شبکه حل، شرایط مرزی و انتخاب مدل آشفتگی در این پژوهش از مصالح ماسه با مشخصات چگالی kg/m^3 ۲۶۵۰، قطر 0.001 m و ضخامت 0.06 m در کف کانال به طول $3/6 \text{ m}$ ، عرض $1/2 \text{ m}$ و ارتفاع 0.8 m استفاده شد. هندسه سه‌بعدی و شبکه‌بندی مدل در شکل (۱) نشان داده شده است.

که، B_i نیروی حجمی در راستای i و μ لزوجت دینامیکی سیال، ρ جرم مخصوص آب، x_i و x_j به ترتیب مختصات جریان در راستای فضایی i و j و δ_{ij} دلتای کرونگر که در آن اگر $i=j$ باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت مقداری برابر صفر دارد (Daneshfaraz et al. 2022).



شکل ۱- هندسه سه‌بعدی و مش بندی مدل

Fig. 1 The 3D geometry and model meshing

از این‌رو مش با ابعاد 5 mm برای شبیه‌سازی سایر مدل‌ها انتخاب شد (Ghaderi et al. 2020). در انتخاب شرایط مرزی، برای ورودی جریان از شرط مرزی دی^۱ و در انتهای کانال از شرط مرزی خروجی^۲ استفاده شده است. همچنین برای دیواره‌ها و کف کانال از شرط مرزی دیوار^۳ و برای مرز بالایی، شرط مرزی متقارن^۴ انتخاب شد. در پژوهش حاضر مدل آشفتگی LES^۵ برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. از دلایل انتخاب این مدل می‌توان به مواردی همچون اطمینان‌پذیری در پاسخ‌گویی به مسائل گوناگون، حل دقیق معادلات و دقت بالا در نشان دادن جزئیات جریان و بررسی مطالعات پیشین

برای انتخاب شبکه‌بندی بهینه ابتدا شبیه‌سازی با ابعاد مش بزرگ انجام پذیرفت و سپس در مراحل بعدی شبیه‌سازی‌ها با ابعاد مش کوچک‌تر از مرحله قبل اجرا شد (Daneshfaraz et al. 2022). در این پژوهش، شبکه بهینه با انجام شبیه‌سازی در 5 حالت، با ابعاد شبکه متفاوت انتخاب گردید (Norouzi et al. 2023). با توجه به اینکه در شبکه با ابعاد $4/5 \text{ mm}$ و 5 نتایج شاخص‌های آماری در تحقیق‌های (Abbaszadeh et al. 2023; Hassanzadeh and Abbaszadeh 2023) حاصل از شبیه‌سازی به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و نتایج مشابهی را در کانتورهای سرعت و میزان رسوب‌گذاری داشتند.

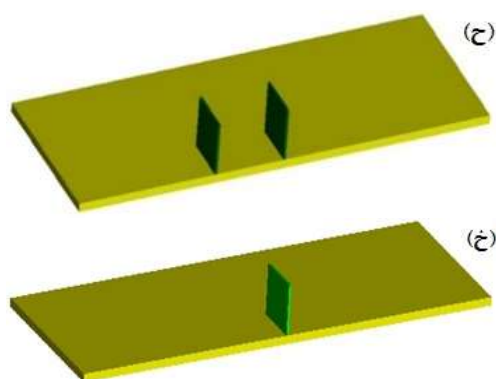
⁴symmetry

⁵Large Eddy Simulation

¹volume flow rate

²outflow

³wall



شکل ۲- مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر: الف- سناریوی ۱: آب‌شکن T شکل، ب- سناریوی ۲: آب‌شکن I شکل، پ- سناریوی ۳: آب‌شکن L شکل، ت- سناریوی ۴: آب‌شکن L شکل، ث- سناریوی ۵: آب‌شکن I شکل با زاویه 30° ، ج- سناریوی ۶: آب‌شکن I شکل با زاویه 60° ، ح- سناریوی شماره ۷: دو آب‌شکن I شکل با فاصله 0.80 m از یکدیگر، ح- سناریوی شماره ۸: دو آب‌شکن I شکل با فاصله 0.60 m از یکدیگر، و خ- سناریوی شماره ۹ و ۱۰: یک آب‌شکن I شکل

Fig. 2 Studied models in the present research: a) Scenario No. 1: T-shaped groyne, b) Scenario No. 2: I-shaped groyne, c) Scenario No. 3: L-shaped groyne, d) Scenario No. 4: L-shaped groyne, e) Scenario No. 5: I-shaped groyne with an angle of 30° , f) Scenario No. 6: I-shaped groyne with an angle of 60° , g) Scenario No. 7: 2 I-shaped groynes with a distance of 0.80 m from each other, h) Scenario No. 8: two I-shaped groynes with a distance of 0.60 m from each other, and i) Scenario No. 9 and 10: I-shaped groyne

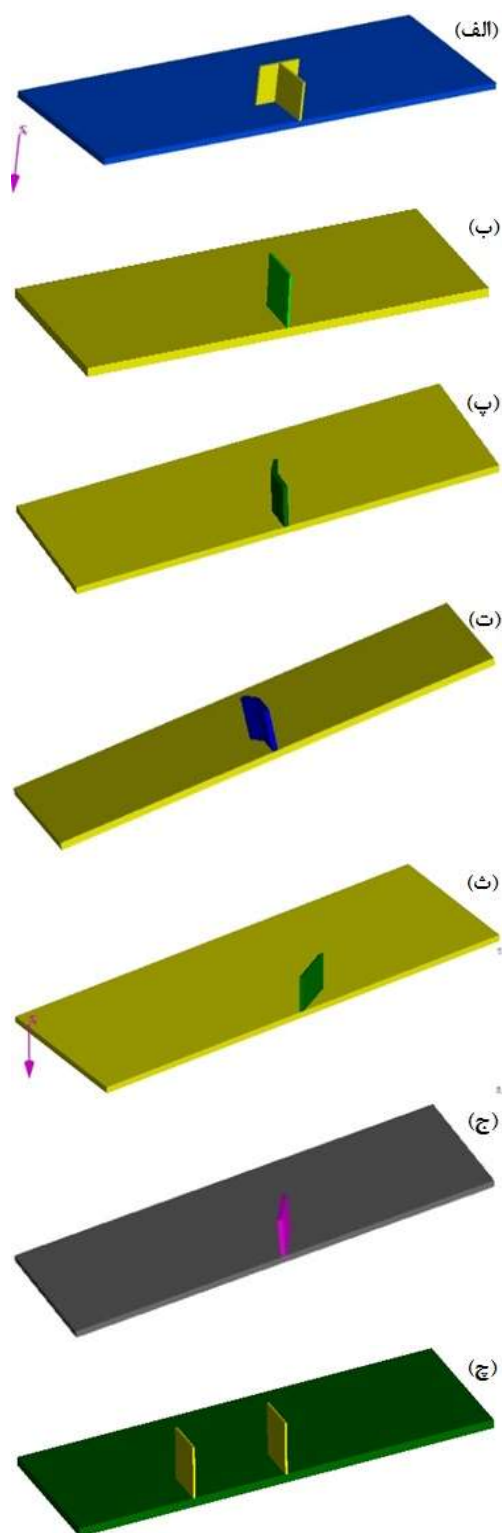
جدول ۱- سناریوهای مورد بررسی
Table 1 The examined scenarios

No.	Scenario name	Q (l/s)
1	T-Q285	28.5
2	I-Q285	28.5
3	LRight-Q285	28.5
4	LLeft-Q285	28.5
5	I30-Q285	28.5
6	I60-Q285	28.5
7	DI80-Q285	28.5
8	DI60-Q285	28.5
9	I-Q200	20
10	I-Q350	35

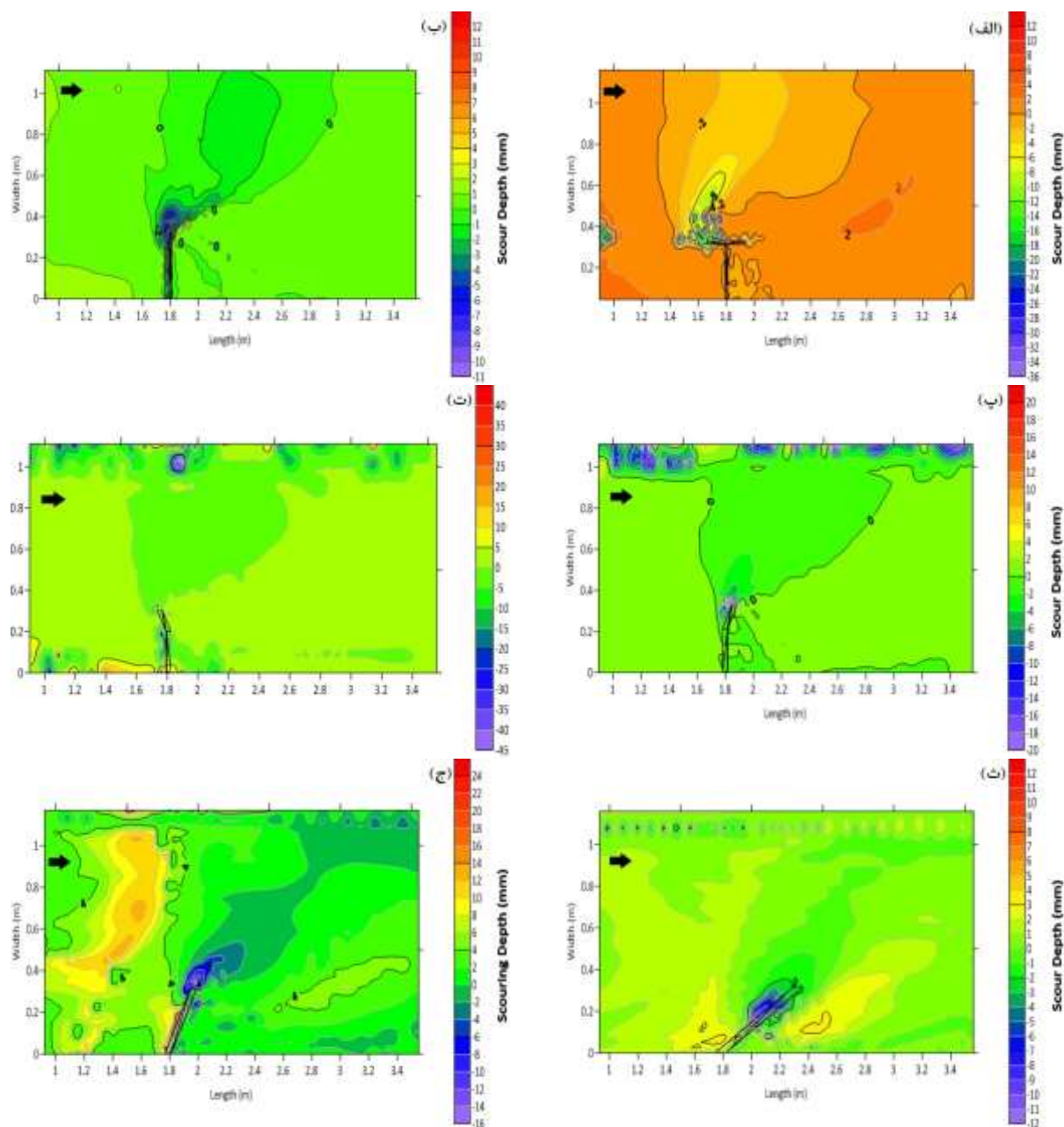
۳- یافته‌ها و بحث

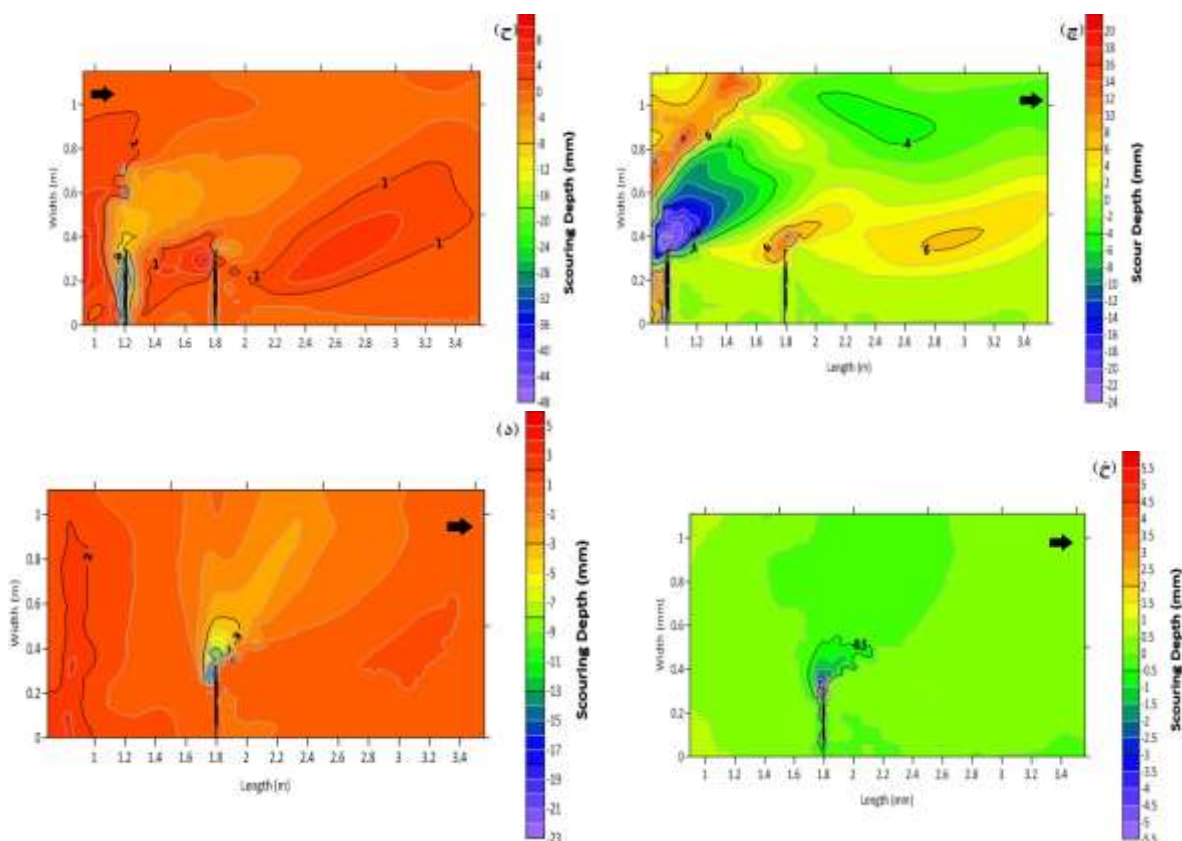
با توجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی، حل عددی به صورت غیردائمی شروع شده و تا زمان رسیدن جریان به حالت ماندگار و پایدار، ادامه پیدا می‌کند. در شکل‌های (۳) و (۴)، به ترتیب

اشاره نمود (McCoy et al. 2008; Kirkil et al. 2009; Daneshfaraz et al. 2023). در تعریف شرایط اولیه توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیکی تعریف شده است. همچنین مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل (۲) و جدول (۱) آورده شده است.



وضعیت رسوب و سرعت تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.





شکل ۳- وضعیت رسوب در کف کانال تحت سناریوهای مختلف: الف- T-Q285، ب- I-Q285، پ- LRight-Q285، ت- LLeft-Q285، ج- I30-Q285، ح- I60-Q285، خ- DI80-Q285، د- DI60-Q285، ز- I-Q200، و د- I-Q350

Fig. 3 Sediment condition on the channel bottom under different scenarios: a) T-Q285, b) I-Q285, c) LRight-Q285, d) LLeft-Q285, e) I30-Q285, f) I60-Q285, g) DI80-Q285, h) DI60-Q285, i) I-Q200, and j) I-Q350

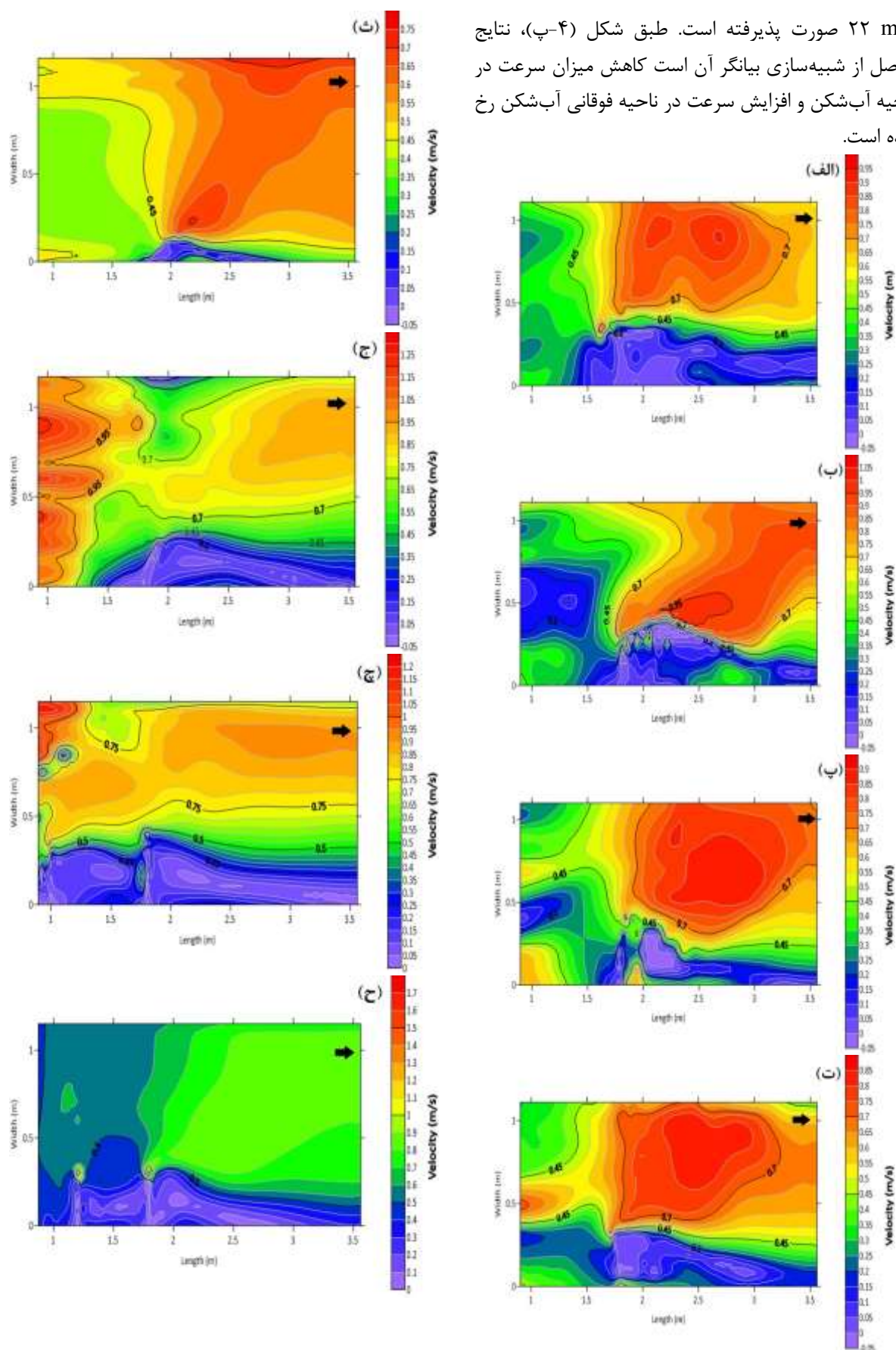
ناحیه فوقانی آبشکن است (شکل ۴-ب). کانتور سرعت در قسمت تیغه آبشکن تغییرات بسیاری دارد که این امر منجر به ایجاد ناحیه فرسایشی و تلماسه‌ای در نزدیکی یکدیگر می‌شود. به‌طوری‌که کاربرد آبشکن منجر به کاهش سرعت جریان در قبل و بعد از آبشکن شده است، که دلیل آن را می‌توان به‌صورت مانع عمل کردن آبشکن دانست که منجر به کاهش میزان فرسایش در آن ناحیه می‌گردد. عکس این موضوع در دیواره بالایی نیز صادق بوده و عدم وجود آبشکن در آن قسمت باعث افزایش سرعت جریان و به‌تبع آن افزایش آبشستگی می‌گردد.

در سناریوی سوم بنام LRight-Q285 آبشکن L شکل مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس دبی ورودی $28/5 \text{ l/s}$ با توجه به شکل (۳-پ)، نتایج نشان داد که میزان آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر 20 mm رسیده است. همچنین میزان رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در نوک تیغه به مقدار

مطابق شکل (۳-الف)، در سناریوی اول از یک تیغه آبشکن T شکل استفاده شده است. مطابق شکل (۳-الف) مشاهده شد که وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر 36 mm بوده و 13 mm رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در مجاورت نوک تیغه رخ داده است. کانتور سرعت در شکل (۴-الف)، نشان‌دهنده کاهش میزان سرعت در ناحیه آبشکن و افزایش میزان سرعت در ناحیه فوقانی آبشکن است. همچنین یکنواختی کانتور سرعت در قسمت مربوط به آبشکن برای این سناریو منجر به یکنواختی رسوب (بدون ایجاد تلماسه یا فرسایش بالا) در ناحیه تحتانی می‌شود.

در سناریوی دوم وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر 11 mm است (شکل ۳-ب). از طرفی دیگر 13 mm رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در کناره نوک تیغه آبشکن I شکل در وسط کانال رخ داده است. کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آبشکن I شکل و افزایش سرعت در

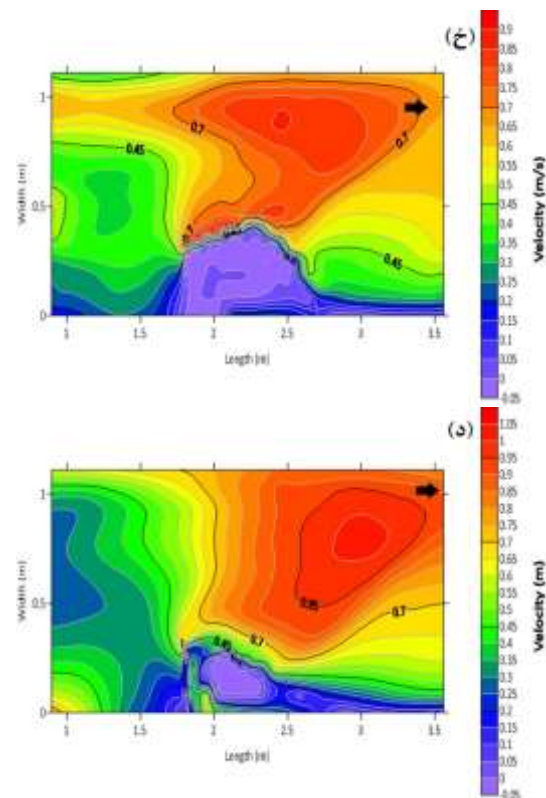
۲۲ mm صورت پذیرفته است. طبق شکل (۴-پ)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر آن است کاهش میزان سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن رخ داده است.



فوقانی آب‌شکن است. شکل (۴-ث) مؤید این است که کاربرد آب‌شکن در حالت زاویه‌دار اثرگذاری آن را کم کرده است، به‌طوری‌که زاویه بسیار آب‌شکن منجر به کاهش مساحت با سرعت کم در کانال می‌شود که نشان‌دهنده کم اثر بودن این سناریو در کاهش میزان سرعت جریان است. سناریو I60-Q285 از یک تیغه آب‌شکن I شکل با زاویه 60° از دیواره پائینی استفاده شده و دبی $28/5 \text{ l/s}$ به آن وارد می‌شود. بر اساس شکل (۳-ج) و با شبیه‌سازی جریان می‌توان مشاهده کرد که وضعیت آب‌شستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر 16 mm بوده و رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در وسط تیغه به میزان 26 mm رخ داده است. کانتور سرعت در شکل (۴-ج)، نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن است. در سناریوی ششم با زاویه 60° ، آب‌شکن علاوه بر کاهش سرعت در ناحیه تحتانی منجر به افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن به‌اندازه سایر سناریوها نشده است. این سناریو در مقایسه با سناریوی پنجم به‌دلیل کاهش زاویه به‌کارگیری آب‌شکن و نزدیکی آن به حالت قائم، اثرگذاری بیشتری در کاهش میزان سرعت جریان در ناحیه آب‌شکن دارد.

در سناریوی هفتم مطابق شکل (۳-چ)، مشاهده می‌گردد که وضعیت آب‌شستگی در نوک تیغه اول به میزان حداکثر 24 mm شده است. درحالی‌که در تیغه دوم میزان رسوب‌گذاری به‌اندازه 6 mm قابل‌مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد جریان با سرعت کم در طول کانال و در ناحیه آب‌شکن به‌صورت یکنواخت توزیع شده است. کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن است (شکل ۴-چ).

بر اساس نتایج حاصل از مدل عددی FLOW-3D مقدار آب‌شستگی در سناریوی هشتم در آب‌شکن I شکل با فاصله $0/60 \text{ m}$ از هم در وسط تیغه به 48 mm رسیده است. در این سناریو، 10 mm رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در انتهای کانال رخ داده است که در شکل (۳-ح) قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۴-ح)، کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن می‌باشد. همچنین جریان با سرعت کم در طول کانال در ناحیه آب‌شکن به‌صورت یکنواخت توزیع شده است.



شکل ۴- کانتور سرعت تحت سناریوهای مختلف: الف- T-Q285، ب- I-Q285، پ- LRight-Q285، ت- LLeft-Q285، ث- DI60-Q285، ج- I30-Q285، ح- DI80-Q285، خ- I-Q200، و ذ- I-Q350

Fig. 4 Velocity contour under the different scenarios: a) T-Q285, b) I-Q285, c) LRight-Q285, d) LLeft-Q285, e) I30-Q285, f) I60-Q285, g) DI80-Q285, h) DI60-Q285, i) I-Q200, and j) I-Q350

مطابق شکل (۳-ت)، در سناریوی چهارم، وضعیت آب‌شستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر 45 mm است. همچنین 45 mm رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در دیواره پائینی رخ داده است. کانتور سرعت در شکل (۴-ت)، نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن می‌باشد. همچنین در این سناریو ناحیه عظیم تأثیر پذیرفته از آب‌شکن تا انتهای کانال امتداد دارد که منجر به یکنواختی رسوب می‌شود.

بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سناریوی پنجم نشان می‌دهد که وضعیت آب‌شستگی در وسط تیغه به میزان حداکثر 12 mm رسیده است. همچنین 14 mm رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در مجاورت قسمت آب‌شسته در شکل (۳-ث) قابل مشاهده است. مطابق شکل (۴-ث)، کانتور سرعت بیانگر کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه

شکل (۴-د)، کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آبشکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آبشکن هست. در محدوده قبل از آبشکن، سرعت به دلیل وجود جریان‌های برگشتی دارای مقادیر بسیار کوچک است که البته این سرعت‌های کوچک در مقایسه با آبشکن‌های دو تیغه مشابه به دلیل آب‌گذری کمتر، کوچک‌تر از آبشکن‌های یک تیغه است. در مقایسه با تحقیق (Ansary et al. (2019 کاربرد آبشکن‌های دو تیغه‌ای مانع از ایجاد سرعت‌های منفی شده و میزان سرعت را تا انتها ثابت نگه می‌دارد که منجر به عدم فرسایش بیشتر می‌شود. البته عمده سرعت طولی جریان از نزدیکی مقطع نصب آبشکن آغاز می‌شود و در عرض کانال از مقطع آبشکن تا محل دماغه، افزایش جزئی سرعت و در ادامه تا دیواره مقابل افزایش قابل توجه سرعت جریان مشاهده می‌شود.

سناریوی نهم بنام I-Q200 است که در آن از یک تیغه آبشکن I شکل استفاده شده است. در این حالت دبی ۲۰ l/s در آن وارد می‌شود. همچنین همانند سناریوهای قبلی کف کانال به اندازه ۰/۰۶ m با ماسه پوشانده شده است. وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۵/۵ mm بوده و ۵/۵ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در سمت راست نوک تیغه انباشته شده است (شکل ۳-خ). کانتور سرعت در شکل (۴-خ) نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آبشکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی است.

در سناریوی دهم میزان دبی ورودی ۳۵ l/s است. مطابق شکل (۳-د)، وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۲۳ mm شده است. از طرفی دیگر ۶ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در سمت راست نوک تیغه رخ داده است. با توجه به

جدول ۲- نتایج سناریوهای مورد بررسی
Table 2 Results of the examined scenarios

Scenario No.	Scenario Name	Erosion of the Channel Bottom (cm ³)	Maximum Dune Height (mm)	Maximum Scouring Depth (mm)
1	T-Q285	5780	14	36
2	I-Q285	1320	13	11
3	LRight-Q285	2340	22	20
4	LLeft-Q285	5670	45	45
5	I30-Q285	1010	14	12
6	I60-Q285	1260	26	16
7	DI80-Q285	6210	22	24
8	DI60-Q285	5750	12	48
9	I-Q200	810	6	5.5
10	I-Q350	2520	6	23

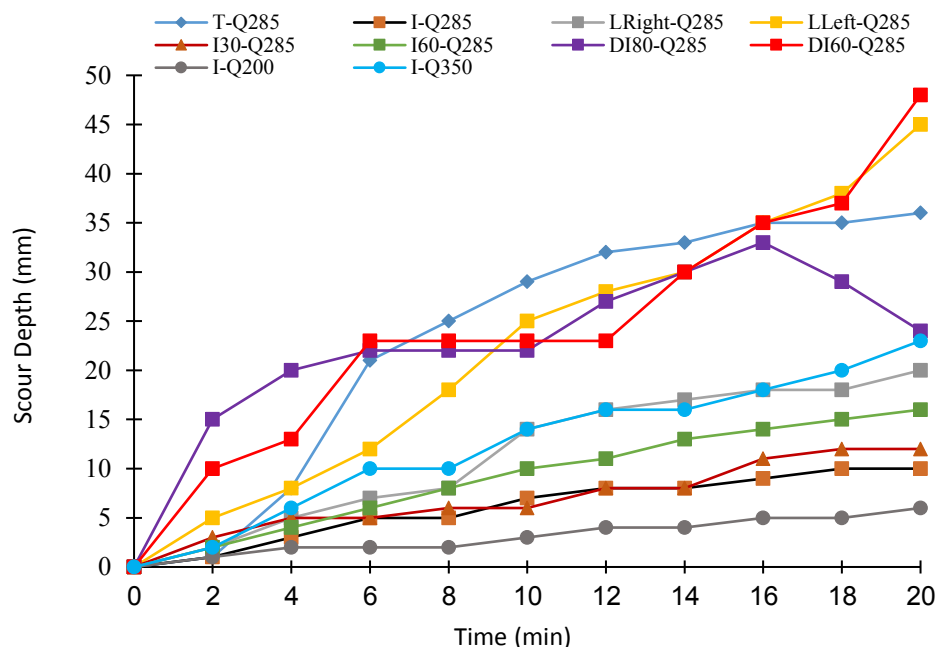
Q285، می‌توان متوجه بیشترین میزان آبشستگی برای سناریوی DI60-Q285 و سپس DI80-Q285 شد. تغییرات دبی در میزان آبشستگی تأثیر بسزایی دارد که این امر به وضوح با مقایسه سناریوهای I-Q285، I-Q200 و I-Q350 قابل مشاهده است. به طوری که با افزایش میزان دبی میزان آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آبشستگی موضعی رخ داده در مجاورت تیغه، اطلاع داشتن از میزان رسوب خارج شده از کانال نیز اطلاعات ارزشمندی را ارائه می‌کند. بدین منظور تغییرات حجم رسوب در کف کانال پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها محاسبه شده است (جدول ۲). از بین ۱۰

با بررسی نتایج به دست آمده از سناریوهای مدل‌سازی شده در جدول (۲) بیش‌ترین عمق آبشستگی در حالت‌هایی که صرفاً یک تیغه موجود بود مربوط به سناریو LLeft-Q285 و LRight-Q285 است. این موضوع در تحقیق (Nayyer et al. (2018 نیز وجود دارد و بیش‌ترین میزان آبشستگی در آبشکن‌های ساده و L شکل دیده شده است. این امر بیانگر تأثیر عملکرد تیغه‌های مخالف در جهت جریان است. به عبارتی دیگر، در صورتی که شکل تیغه موافق جهت جریان نباشد میزان آبشستگی بیشتری در مجاورت آن رخ می‌دهد. با مقایسه سناریوهای I-Q285 و DI60-Q285 و DI80-

می‌کند. این موضوع در پژوهش (Abbasi et al. 2018) نیز دیده شده است. به‌طوری‌که این پدیده تا جایی پیش می‌رود که چاله آبشستگی در آب‌شکن‌های متوالی به یکدیگر متصل می‌شوند.

بهره‌گیری از سری زمانی عمق آبشستگی برای سناریوهای مختلف در کسب اطلاعات در خصوص روند تکاملی آن بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور سری زمانی این تغییرات مطابق شکل (۵) رسم شده است. همان‌طور که مشخص است عمق آبشستگی در تمامی سناریوها با گذر زمان در حال افزایش است و تعادل نیافته است و صرفاً در بازه‌های محدودی رفتاری برخلاف افزایش عمق از خود نشان داده است.

سناریوی مذکور، بیشترین میزان خروج رسوب مربوط به سناریوی DI60-Q285 است. در این سناریو به علت وجود دو عدد تیغه در کانال، گرداب‌های بین آن‌ها منجر به فرسایش زیاد بستر می‌شود. در مقابل سناریوهای I30-Q285 و I-Q200 کم‌ترین میزان فرسایش را دارند که برای مورد اول علت این امر موافق جهت جریان بودن تیغه است. همچنین برای مورد دوم ریشه در کاهش دبی ورودی می‌باشد. لازم به‌ذکر است با مقایسه موارد تک تیغه در شرایط دبی یکسان، سناریوی I-Q200 بیشترین فرسایش را داشته است. هرچند تقریباً در همه حالات، رسوب‌گذاری در بین آب‌شکن‌ها دیده می‌شود، اما در پای آب‌شکن‌ها نیز فرسایش وجود دارد. با افزایش زاویه از 45° به 90° اندازه چاله آبشستگی افزایش پیدا



شکل ۵- سری زمانی عمق آبشستگی

Fig. 5 Time series of scour depth

مورد بررسی، سناریوهای اول، چهارم، ششم، هفتم، هشتم و نهم این شرط را تأمین نموده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

۱- محدوده آبشستگی‌ها عموماً در مجاورت تیغه رخ داده است که به علت جریان گردابی در محدوده تیغه‌ها، تلماسه‌هایی با ارتفاع متناسب با عمق آبشستگی در مجاورت آن ایجاد شده است. در سناریوهایی که از حالت زاویه‌دار تیغه استفاده شده

با بررسی کانتورهای سرعت در سناریوهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که در تمامی سناریوها به‌جز سناریوی که در آن آب‌شکن با زاویه 30° قرار دارد، آب‌شکن قابلیت انتقال جریان از قسمت‌های تحتانی کانال به قسمت‌های مرکزی کانال را داشته است. سناریوی مقبول از این بین در صورت اولویت‌دهی به کانتورهای سرعت، مربوط به سناریوهایی هست که سرعت را تا انتهای کانال ثابت نگه‌داشته است تا از رخداد تلماسه و فرسایش‌های موضعی جلوگیری نمایند. از بین سناریوهای

۴- در تمامی سناریوها، سرعت جریان در ناحیه مربوط به آبشکن به مراتب کمتر از قسمت‌های مرکزی است. این امر منجر می‌گردد تا از فرسایش در نقاط ساحلی جلوگیری شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

است، در دیواره فوقانی، آبشستگی‌ها و تلماسه‌های تکرارشونده رخ می‌دهد.

۲- کاربرد دو آبشکن باعث می‌شود تا در آبشکن اول فرسایش بالایی به وجود آید این درحالی است که در آبشکن بعد از آبشکن اول رسوب‌گذاری رخ می‌دهد.

۳- در حالتی که از دو عدد آبشکن استفاده می‌شود، آبشستگی با کاهش فاصله بین آبشکن‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج تحت شرایط دبی ورودی مختلف، رابطه مستقیم بین افزایش دبی و افزایش فرسایش وجود دارد.

References

- Abbasi, S., Kamanbedast, A., & Ahadian, J. (2011). Numerical investigation of angle and geometric of l-shape groin on the flow and erosion regime at river bends. *World Appl. Sci. J.*, 15(2), 279-284.
- Abbasi, S., Poorshahbaz, H., & Taghvaei, P. (2018). Numerical investigation of flow pattern, erosion and sedimentation around parallel unequal spur dikes under different geometric and hydraulic condition: numerical analysis. *J. Hydraul.*, 13(3), 17-29. DOI: [10.30482/jhyd.2018.81354](https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81354) [In Persian].
- Abbaszadeh, H., Norouzi, R., Sume, V., Kuriqi, A., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2023). Sill role effect on the flow characteristics (experimental and regression model analytical). *Fluid.*, 8(8), 235. DOI: [10.3390/fluids8080235](https://doi.org/10.3390/fluids8080235)
- Alasadi, L. A. R., Khelif, T. H., & Hassan, F. A. (2023). Experimental investigation for the local scour around V-shaped spur-dikes. *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.*, 32(1), 69–86. DOI: [10.22630/srees.4506](https://doi.org/10.22630/srees.4506)
- Amini, A., & Asadi Parto, A. (2017). 3D numerical simulation of flow field around twin piles. *Acta Geophys.*, 65(6), 1243-1251. DOI: [10.1007/s11600-017-0094-x](https://doi.org/10.1007/s11600-017-0094-x)
- Ansary, S., Kahrizi, E., & Fazli, M. (2019). Numerical simulation of bed topography and flow field around double rows-barriers and gabion groin in the direct channel using Flow-3D. *Environ. Water Eng.*, 5(1), 58-70. DOI: [10.22034/jewe.2019.160925.1299](https://doi.org/10.22034/jewe.2019.160925.1299) [In Persian].
- Daneshfaraz, R., Abbaszadeh, H., Gorbanvatan, P., & Abdi, M. (2021). Application of sluice gate in different positions and its effect on hydraulic parameters in free-flow conditions. *J. Hydraul. Struct.*, 7(3), 72-87. DOI: [10.22055/jhs.2022.39208.1196](https://doi.org/10.22055/jhs.2022.39208.1196)
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: an experimental and numerical analysis. *Fluid.*, 7(7), 244. DOI: [10.3390/fluids7070244](https://doi.org/10.3390/fluids7070244)
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P., & Kuriqi, A. (2023). Influence of sill integration in labyrinth sluice gate hydraulic performance. *Innov. Infrastruct. Solution.*, 8(4), 118. DOI: [10.1007/s41062-023-01083-z](https://doi.org/10.1007/s41062-023-01083-z)
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Dasineh, M., & Di Francesco, S. (2020). Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal-triangular labyrinth weirs. *Water*, 12(7), 1992. DOI: [10.3390/w12071992](https://doi.org/10.3390/w12071992)
- Giglou, A. N., Mccorquodale, J. A., & Solari, L. (2018). Numerical study on the effect of the spur dikes on sedimentation pattern. *Ain Shams Eng. J.*, 9(4), 2057-2066. DOI: [10.1016/j.asej.2017.02.007](https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.02.007)
- Hassanzadeh, Y., & Abbaszadeh, H. (2023). Investigating discharge coefficient of slide gate-sill combination using expert soft computing models. *J. Hydraul. Struct.*, 9(1), 63-80. DOI: [10.22055/jhs.2023.43683.1251](https://doi.org/10.22055/jhs.2023.43683.1251)

- Hosseini, R., Fazloul, R., Saneie, M., & Amini, A. (2018). Bagged neural network for estimating the scour depth around pile groups. *Int. J. River Basin Manage.*, 16(4), 401-412. DOI: [10.1080/15715124.2017.1372449](https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1372449)
- Kirkil, G., Constantinescu, G., & Ettema, R. (2009). Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole. *J. Hydraul. Eng.*, 135, 888-901. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000101](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000101)
- Man, C., Zhang, G., Hong, V., Zhou, S., & Feng, Y. (2019) Assessment of turbulence models on bridge-pier scour using Flow-3D. *World J. Eng. Technol.*, 7(2), 241-255. DOI: [10.4236/wjet.2019.72016](https://doi.org/10.4236/wjet.2019.72016)
- McCoy, A., Constantinescu, G., & Weber, L. J. (2008). Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes. *J. Hydraul. Eng.*, 134(2), 157-172. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(157))
- Nayyer, S., Farzin, S., Karami, H., & Rostami, M. (2018). Experimental study on the effect of spur dike's different shapes and on time variation of scour depth around them. *Irrig. Drain. Struct. Eng. Res.*, 19(72), 33-50. DOI: [10.22092/idser.2017.114741.1238](https://doi.org/10.22092/idser.2017.114741.1238) [In Persian].
- Nayyer, S., Farzin, S., Karami, H., & Rostami, M. (2019). A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 41, 256. DOI: [10.1007/s40430-019-1757-0](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1757-0)
- Norouzi, R., Ebadzadeh, P., Sume, V., & Daneshfaraz, R. (2023). Upstream vortices of a sluice gate: An experimental and numerical study. *AQUA—Water Infrastruct., Ecosyst. Soc.*, 72(10), 1906-1919. DOI: [10.2166/aqua.2023.269](https://doi.org/10.2166/aqua.2023.269)
- Othman Ahmed, K., Amini, A., Bahrami, J., Kavianpour, M. R., & Hawez, D. M. (2021). Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Practice*, 12(4), 04021040. DOI: [10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578)
- Pourshahbaz, H., Abbasi, S., Pandey, M., Pu, J. H., Taghvaei, P., & Tofangdar, N. (2022). Morphology and hydrodynamics numerical simulation around groynes. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 28(1), 53-61. DOI: [10.1080/09715010.2020.1830000](https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1830000)
- Yazdi, J., Sarkardeh, H., Azamathulla, H. Md., & Ghani, A. A. (2010). 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow. *Int. J. River Basin Manage.*, 8(1), 55-62. DOI: [10.1080/15715121003715107](https://doi.org/10.1080/15715121003715107)