


Numerical Investigation of Straight Longitudinal Training Walls on the River Bank Protection

Seyed Mojtaba Razavi Mozaffar Moghaddam ¹, Amir-Abbas Abedini ^{2*}

1- MSc Graduate in Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

* aabedini@shahroodut.ac.ir

Received: 9 March 2022, Accepted: 12 June 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: River training is the stabilization of the channel in order to maintain the desired cross-section and alignment. Channel stabilization and restoration efforts have been increased dramatically with excessive cost since 1990. However, it is estimated that at least 50% of these projects fail and others may not perform as expected. Therefore, stream restoration today is more of an art than a science. Rivers have been trained for centuries by series of transverse groynes which are structures constructed at an angle to the flow in order to deflect the flowing water away from critical zones. This generally results in damages to their ecosystems as well as in undesirable long-term morphological developments. To maintain a navigable channel and improve flow conveyance by dividing the channel into main and side channels, engineers have recently proposed constructing longitudinal training walls as an alternative to the traditional transverse groynes. The effectiveness of longitudinal training walls in achieving these goals and their long-term effects on the river morphology have not been thoroughly investigated yet. In particular, studies that assess the bed and wall shear stresses of the parallel channels separated by the training walls are still lacking.

Methodology: In the present study, the performance of longitudinal training walls on bed and wall shear stresses was compared with the traditional transverse groynes. Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with the $k-\epsilon$ turbulence model were solved numerically by applying finite volume method using Flow-3D software. Results of the single groyne simulation were validated based on experimental data with a good agreement. The experimental channel had rectangular cross-section of width $B=0.9144\text{m}$ and slope $S_0=10^{-4}$, groyne was a parallelepiped of length $b=B/6=0.1524\text{m}$ and thickness of 3 mm. In addition, results of the series of groynes simulation were compared to the available numerical data, shown a good agreement. After validation, continuous longitudinal training walls were simulated with equivalent length to a series of groynes with uniform and non-uniform configuration in three transverse positions $y/B=1/2$, $y/B=1/3$ and $y/B=1/6$. Uniform configuration of groynes was included three groynes with $D/b=6$ and 23 spacing and non-uniform configuration was included eight groynes, first five groynes with $D/b=1.5$ and four other groynes with $D/b=6$ spacing. Also, non-continuous longitudinal training walls were simulated with the same transverse positions for $D/b=23$. The hydrodynamic behavior of the bed and wall shear stresses was considered, since the starting point of longitudinal training walls affects the morphodynamic behavior of the flow, the starting position of the walls was fixed and only different transverse positions with different lengths were simulated.

Results and Discussion: Here we analyze the bed and wall shear stresses in open channel flow by training channel in a new way by subdividing their channel in parallel channels with specific functions with longitudinal training walls. The results showed that the longitudinal training walls system reduces the bed shear stress compared to the groyne system and as a result we will have less erosion in the bed. However, some small increases in wall shear stresses were seen in all simulations of longitudinal training walls. The closer the transverse position of the longitudinal training walls to the channel wall, the lower wall shear stresses. Furthermore, if the longitudinal training wall system is implemented in non-continuous form, due to the drop in flow energy at the beginning and end of each wall, the flow energy drop leads to a decrease in velocity and due to the direct relationship between velocity changes and shear stress, bed and wall shear stresses in side channel can be reduced further, that this reduction depends on the transverse position and, more importantly, whether or not this transverse position has created a mild flow conditions in the side channel. Therefore, this system by providing a mild flow condition in the side channel which is shallower channel, has a favorable effect on aquatic habitat, ecosystem, and wall shear stress. Besides, by providing a deep navigable main channel, can increase the ability of transferring additional flood discharge.

Conclusion: In this study, twelve simulations were performed with different lengths for longitudinal training walls in different transverse positions with continuous and non-continuous forms. The results showed that this system, compared to the traditional groyne system, introduces less bed shear stress and by providing a mild flow condition in the side channel, has the ability to control the wall shear stress dynamically. This system has a favorable effect on aquatic habitat and ecosystem, beside high ability to transfer additional flood discharge. So, longitudinal training walls can be used as an appropriate replacement for traditional transverse groynes.

Keywords: Longitudinal Training Walls, Flow-3D, RANS, $k-\epsilon$, Shear Stress, Groyne.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی عددی کارکرد دیواره‌های طولی اصلاحی مستقیم در حفاظت از ساحل‌های آبراهه‌ها

سید مجتبی رضوی مظفر مقدم^۱، امیرعباس عابدینی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۲- استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

* aabedini@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: تلاش‌های تثبیت و ترمیم آبراهه به طور چشمگیری از سال ۱۹۹۰ افزایش پیدا کرده‌است و هزینه‌های گزافی در این زمینه انجام می‌شود درحالی که دست‌کم ۵۰٪ پروژه‌ها با شکست روبرو می‌شوند و مابقی نیز ممکن است مطابق انتظارات عمل نکنند. مهندسان به تازگی احداث دیواره‌های طولی اصلاحی را به عنوان جایگزینی برای آبشکن‌های عرضی پیشنهاد داده‌اند که هدف از آن ایجاد یک آبراهه قابل کشتیرانی و بهبود انتقال جریان با تقسیم آبراهه به دو قسمت اصلی و فرعی می‌باشد. در این تحقیق کارکرد دیواره‌های طولی اصلاحی و سازه‌های آبشکن بر روی تنش برشی بستر و دیواره‌ی آبراهه بوسیله‌ی معادله‌های RANS با مدل $k-\epsilon$ به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D بررسی شد. نتایج حالت تک‌آبشکن با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی و نتایج حالت‌های سری آبشکن‌ها با داده‌های عددی موجود مقایسه شد که از همخوانی مناسبی برخوردار بودند. در این پژوهش سازه‌های دیواره‌های طولی اصلاحی در موقعیت‌های عرضی متفاوت به صورت‌های ممتد و ناممتد با طول‌های متفاوت شبیه‌سازی شد. نتایج نشان دادند که این سامانه در مقایسه‌ی با سامانه آبشکن، تنش برشی کمتری را به بستر وارد می‌کند و قابلیت کنترل تنش برشی دیواره را نیز به صورت پویا داراست. این سامانه با فراهم آوردن عمق مناسب در آبراهه اصلی باعث بهبود نوابری می‌شود، با فراهم آوردن یک وضعیت آرام در قسمت آبراهه فرعی، اثرگذاری‌های مطلوبی بر زیستگاه آبزیان و بوم‌شناسی سامانه دارد و افزون بر آن توانایی بالایی برای انتقال دبی اضافی سیلاب دارد. در نتیجه این سامانه می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب به جای سازه‌های آبشکن، استفاده شود.

کلید واژگان: دیواره‌های طولی اصلاحی، Flow-3D، RANS، $k-\epsilon$ ، تنش برشی، آبشکن.

۱- مقدمه

نمود. برای دستیابی به هدف‌های یاد شده، سه روش سازه‌های عرضی، سازه‌های تثبیت بستر و پره‌های زیرآبی، و سازه‌های طولی اصلاحی ممکن است (Yossef, 2002).
Rajaratnam and Nwachukwu (1983) به بررسی آزمایشگاهی جریان پیرامون سازه‌ی آبشکن پرداختند. کار آنان نشان می‌دهد که ناحیه‌ی آشفتگی در پایین‌دست آبشکن، بزرگتر از بالادست آبشکن است. آن‌ها این ناحیه‌ی آشفتگی را با تقسیم به دو زیرناحیه‌ی انحرافی و برشی، تحلیل کردند که نتایج کارشان به این شرح است: بیشینه

آموزش و اصلاح رودخانه، تثبیت آبراهه به منظور دستیابی به مقطع عرضی و تراز آب مورد نظر می‌باشد. به طور کلی از هدف‌های اصلاح رودخانه می‌توان به: افزایش ایمنی در برابر سیل با تطبیق جریان سیلاب، محافظت از ساحل، بهبود کارایی انتقال رسوب، به کمترین رساندن فرسایش رودخانه با ایجاد ثبات در مسیر جریان، هدایت جریان به مسیر مطلوب رودخانه، کاهش احتمال یخ‌زدگی رودخانه، و بهبود نوابری با حفظ مناسب عمق آب در آبراهه، اشاره

استفاده از نرم‌افزار Delf-3D نشان داده‌اند که با وجود مجهول‌های بسیاری که در زمینه‌ی نحوه‌ی اجرا و پایداری دیواره‌های طولی اصلاحی وجود دارد، اما یک طراحی دقیق می‌تواند منجر به پایداری این سامانه شود. به عنوان نمونه در شکل ۱- a مشاهده می‌شود که آبشکن‌های رودخانه وال در هلند به طول ده کیلومتر با سامانه دیواره‌های طولی اصلاحی جایگزین شده‌اند.

(Collas et al. (2018) به بررسی کارکرد دیواره‌های طولی اصلاحی ساخته شده بر رودخانه راین، از منظر بهبود بوم‌شناسی سامانه و زیستگاه آبزیان پرداخته‌اند که نتیجه‌ی کار آنان همان طور که در شکل ۱- b نشان داده شده است، کارکرد موفق سازه‌ی دیواره‌ی طولی اصلاحی را نشان می‌دهد چراکه در قسمت آبراهه کناری، یک وضعیت آرام^۴ با نوسان‌های کمتر سرعت را خواهیم داشت.

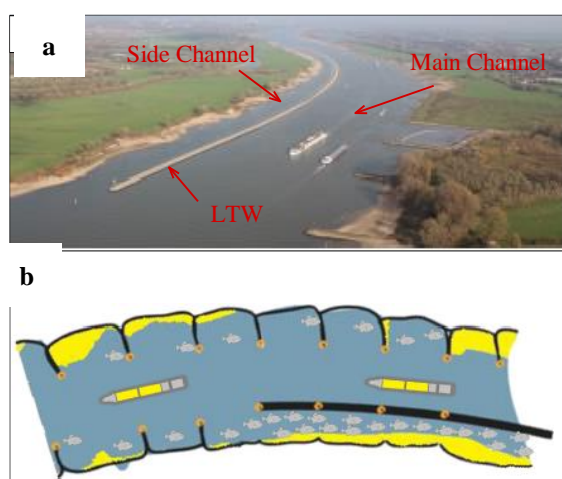


Fig. 1 (a) Groynes in the river Waal were replaced by LTW (b) assistance to the environment by LTW

شکل ۱ (a) جایگزینی آبشکن‌های رودخانه وال با LTW (b) کمک به محیط زیست توسط LTW

(Ruijscher et al. (2020) به صورت میدانی برخی فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان مانند دبی، عمق و عدد فرود را در هر دو قسمت آبراهه اصلی و آبراهه فرعی رودخانه وال اندازه‌گیری کردند. موارد اندازه‌گیری شده نشان دادند که در همه مدت: دبی ورودی به آبراهه اصلی بیشتر از آبراهه فرعی بوده‌است، آبراهه اصلی پرمعق‌تر از آبراهه فرعی بوده‌است و آبراهه فرعی عدد فرود کمتری

برش در نوک آبشکن رخ می‌دهد، طول جریان چرخشی دوازده برابر طول آبشکن است.

پیرامون سازه‌های عرضی آبشکن، جریان به صورت چرخشی است. این جریان‌های چرخشی در حالتی که فاصله‌ی بین آبشکن‌ها به درستی طراحی شده باشند، می‌توانند باعث کاهش تنش برشی وارد بر دیواره‌ی آبراهه شوند و از حمله‌ی مستقیم آب به ساحل جلوگیری کنند (Yossef, 2002).

(Koutrouveli et al. (2018) در کاری عددی، آبراهه آزمایشگاهی (Rajaratnam and Nwachukwu (1983) را شبیه‌سازی کردند و پس از صحت‌سنجی کارشان در حالت تک‌آبشکن با این کار آزمایشگاهی، به بررسی نقش فاصله‌ی آبشکن‌ها بر روی تنش برشی بستر و دیواره در آبراهه باز مستطیلی در حالت‌های مختلف مجموعه‌ی آبشکن‌ها با استفاده از معادله‌های RANS و نرم‌افزار فلوئنت، پرداختند. آنان موفق شدند پیکربندی بهینه سری آبشکن‌ها که منجر به کمترین تنش برشی دیواره و بیشینه تنش برشی بستر می‌شود را ارائه نمایند.

آبشکن‌ها با وارد آوردن تنش برشی بزرگ به بستر رودخانه، در دراز مدت اثرگذاری‌های نامطلوبی بر ریخت‌شناسی می‌گذارند و باعث تغییر و دگرگونی‌های نامطلوب ریخت‌شناختی می‌شوند. این سازه‌ها هنگامی که دبی رودخانه زیاد باشد، باعث سد کردن جریان می‌شوند که این امر باعث اعمال فشار به دیواره‌های ساحل می‌شود و اگر شرایط آب و هوایی نامساعد باشد، این فشار می‌تواند بیش از پیش باشد. محققان به تازگی برای اصلاح مشکلات بوم‌سامانه، بهبود انتقال دبی سیلاب و بهبود فرسایش بستر، احداث دیواره‌های طولی اصلاحی^۱ را به عنوان جایگزینی برای آبشکن‌های عرضی سنتی، پیشنهاد داده‌اند که هدف از این پیشنهاد، ایجاد یک آبراهه قابل کشتیرانی و بهبود انتقال جریان با تقسیم آبراهه به دو قسمت آبراهه اصلی^۲ (پر عمق) و آبراهه فرعی^۳ (کم عمق) می‌باشد (Le, 2018).

(Le et al. (2018b) با کار بر روی ۱۰۲ مورد عددی و

1 Longitudinal Training Walls or LTW
2 Main Channel
3 Side Channel

در رابطه‌های بالا اندیس‌های i و j می‌توانند اعداد ۱، ۲ و ۳ را به خود اختصاص دهند که به ترتیب نشان دهنده‌ی محورهای x ، y و z می‌باشند و بنابراین u_i می‌تواند سرعت‌های در سه جهت یعنی u ، v ، w را نشان دهد. همچنین ρ چگالی آب، P فشار، g_i شتاب جاذبه در سه جهت و τ_{ij} تنش‌های رینولدزی هستند که از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = -\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

در رابطه‌ی بالا، u'_i مولفه‌های سرعت نوسانی، ν_t لزجت گردابه‌ای، k انرژی جنبشی گردابه‌ای و δ_{ij} تابع دلتای کرونکر می‌باشد.

به دلیل استفاده‌ی نرم افزار Flow-3D، از روش‌های فنی حجم سیال (VOF) و کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) ۲، شکل معادله‌های حاکم بر جریان سیال، اندکی تغییر می‌کنند (FLOW-3D® Version 11.2 Users Manual, 2016).

نرم‌افزار Flow-3D شش مدل آشفتگی را پشتیبانی می‌کند که در این تحقیق، از روش دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده شده است چرا که Launder and Spalding (1974) به بررسی محاسبه‌های عددی جریان‌های آشفته با روش دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ برای ۹ نوع مختلف جریان پرداختند و کار آنان نشان داد که این روش در بسیاری از مسئله‌های آشفتگی می‌تواند پاسخ‌های قابل قبولی را ارائه دهد. توضیح‌های تکمیلی برای انتخاب روش آشفتگی، در بخش ۳-۱ ارائه شده است.

۲-۲-۲ روش حل

در این پژوهش برای حل عددی معادله‌های سه‌بعدی RANS برای جریان تراکم‌ناپذیر و آشفتگی دائمی در آبراهه باز، از نرم‌افزار Flow-3D که از شبکه‌ی حل مکعب مستطیلی و روش عددی حجم محدود بهره می‌برد، استفاده شده است. گام‌های شبیه‌سازی در نرم افزار به اختصار در شکل ۲ نشان داده شده است و در قسمت بعد،

داشته‌است.

(Mosselman (2020) به بررسی روش‌های اصلاح رودخانه پرداخت. او عنوان می‌کند که بسیاری از کشورهای توسعه یافته با بازگرداندن فضا به طبیعت بوسیله‌ی حذف روش‌های سنتی اصلاح رودخانه، به دنبال احیای بوم‌شناختی رودخانه‌ها هستند. به عنوان مثال جایگزینی آبشکن‌های سنتی رودخانه‌ی وال به طول ده کیلومتر با دیواره‌های طولی اصلاحی که به صورت آزمایشی انجام شده‌است، کارکرد مناسب و بسیار موفق این سامانه جدید را نشان می‌دهد.

(Osorio et al. (2020) به بررسی پایداری دیواره‌ی طولی اصلاحی پرداختند. آنان عنوان می‌کنند که پایداری این سامانه به شدت وابسته‌ی به میزان رسوب ورودی به آبراهه اصلی و آبراهه فرعی است و نرخ رسوب ورودی باید در حالت تعادل باشد. آنان بیان می‌کنند که به دلیل وجود مجهول‌های بسیار در این زمینه، پرسش‌هایی مانند: چگونگی برآورد رسوب ورودی، چگونه ساده کردن فرآیند انتقال رسوب به حالت دو بعدی، و نیز پرسش‌هایی دیگر، همچنان بی پاسخ مانده‌اند.

به منظور تعیین کارایی و ارزیابی این سامانه جدید پیشنهادی، بررسی‌های بلند و کوتاه مدت روی آن آغاز شده‌است. در همین راستا این پژوهش قصد مقایسه‌ی تنش برشی وارد بر بستر و دیواره را در دو حالت زیر دارد: الف- سامانه سنتی آبشکن ب- سامانه جدید دیواره‌های طولی اصلاحی.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱-۲ رابطه‌های حاکم

برای جریان آشفتگی دائمی معادله‌های بقای جرم و ناویر-استوکس در سه جهت، به صورت برداری و به ترتیب در رابطه‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند:

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

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (2)$$

1 Volume of Fluid Method

2 Fractional Area- Volume Obstacle Representation Method

توضیح‌های بیشتری ارائه شده است.

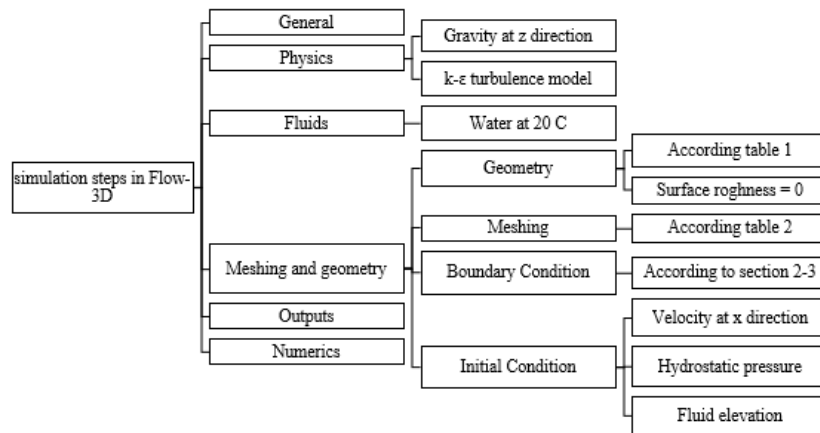


Fig. 2 Simulation steps in Flow-3D

شکل ۲ گام‌های شبیه‌سازی در Flow-3D

جدول ۱ ویژگی‌های آبراهه آزمایشگاهی، آبشکن، جریان و دیواره‌های طولی اصلاحی که در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده‌اند.

Table 1 Laboratory channel specifications, groyne, flow and Longitudinal training walls used in the numerical simulations.

Specifications	Notation	Unit	Value
Channel	L_1	m	$12b=18.288$
	L_2	m	$120b=18.288$
	B	m	0.9144
	S_0	-	0.0001
	Height	m	$2.5d_0=0.4725$
Groyne	Thickness	mm	3
	b	m	$\frac{B}{6} = 0.1524$
	Height	m	$2d_0=0.378$
Flow	u_0	$m\ s^{-1}$	0.262
	Q	$m^3\ s^{-1}$	0.045326
	d_0	m	0.189
	ρ	$kg\ m^{-3}$	998.2
	Fr at upstream	-	0.19
	Re	-	34900
	R	m	0.134
	τ_0	pa	$\gamma R s_0=0.131$
LTW	Height	m	$2d_0=0.378$
	Thickness	mm	3

Note: For LTW length, please see table 4.

موقعیت آبشکن در $x/b=120$ است که به اندازه‌ی کافی از ورودی و خروجی فاصله داشته باشد. تا جریان به طور کامل توسعه یابد.

۲-۳- شبیه‌سازی عددی مدل

در این تحقیق به منظور ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی، نتایج برای حالت تک‌آبشکن با کار آزمایشگاهی Rajaratnam and Nwachukwu (1983) صحت‌سنجی شد و برای حالت‌های سری آبشکن‌ها که نتایج آزمایشگاهی آن در دسترس نیست، از نتایج تحقیق عددی Koutrouveli et al. (2018) استفاده شد، چراکه در کارشان از آبراهه آزمایشگاهی یاد شده استفاده کرده و این کار آزمایشگاهی را گسترش داده‌اند. ویژگی‌های آبراهه آزمایشگاهی، آبشکن، جریان و دیواره‌های طولی اصلاحی که در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده‌اند، در جدول ۱ آورده شده‌است و در ادامه شرح داده می‌شوند.

در جدول ۱، L_1 فاصله‌ی ابتدای آبراهه تا ابتدای آبشکن، L_2 فاصله‌ی انتهای آبشکن تا انتهای آبراهه، B عرض کانال، S_0 شیب طولی آبراهه، b طول آبشکن در جهت y ، u_0 سرعت اولیه‌ی جریان، Q دبی جریان، d_0 عمق اولیه‌ی جریان، ρ چگالی آب، Fr عدد فرود جریان بالادست آبشکن، Re عدد رینولدز جریان، R شعاع هیدرولیکی و τ_0 تنش برشی اولیه‌ی بالادست آبشکن می‌باشد. در جدول یاد شده ارتفاع و ضخامت آبشکن و دیواره‌ی طولی اصلاحی نیز مشخص شده است و از آنجا که طول دیواره‌ی طولی اصلاحی در شبیه‌سازی‌های مختلف، متفاوت بوده است، توضیح‌های آن در جدول ۴ در بخش ۳-۲ ارائه شده است.

تودرتو^۳، در جدول ۲ بررسی و ارزیابی شد. در جدول ۲، Δy and $\Delta z \Delta x$ ابعاد مش در راستاهای x, y and z را نشان می‌دهند و b طول آبشکن در جهت y می‌باشد. نتایج ناشی از مش‌بندی‌های یاد شده در جدول ۱، برای سرعت در شکل ۴، آورده شده است.

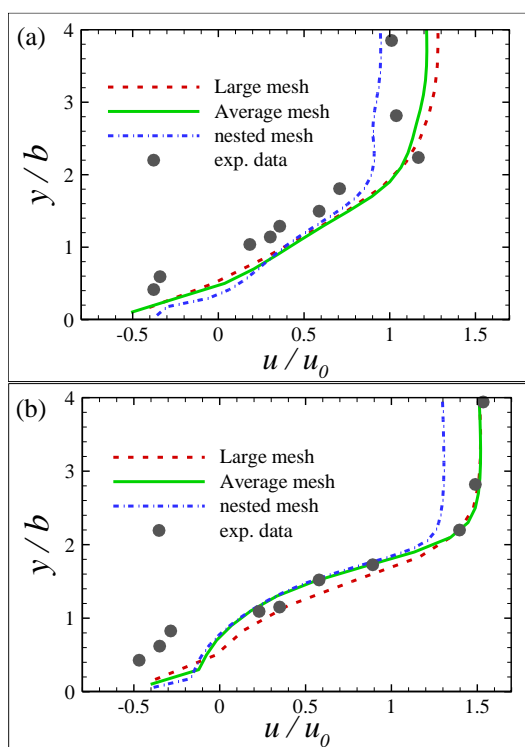


Fig. 4 Profile of velocity at $x/b=126$ and levels: (a) $z/d=0.03$ (b) $z/d=0.85$. Comparison between different meshes results and experimental.

شکل ۴ مقایسه‌ی نتایج مش‌بندی‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی برای سرعت در موقعیت $x/b=126$ در (a) $z/d=0.85$ (b) $z/d=0.03$

به دلیل قابل قبول بودن نتایج مش متوسط و همچنین هزینه محاسبه‌شده مناسب آن، در ادامه‌ی کار از این مش‌بندی که ابعاد آن به صورت، $\frac{\Delta y}{b} = \frac{\Delta z}{b} = 0.197 \frac{\Delta x}{b}$ می‌باشد، استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آبشکن

با توجه به جدول ۳، هدف از شبیه‌سازی تک آبشکن، انجام صحت‌سنجی بوده است که برخی از نتایج در شکل

در ادامه‌ی بحث، نتایج تنش برشی دیواره، برای دیواره‌ای که با توجه به مختصات شکل ۳، در موقعیت $y=0$ قرار دارد ارائه شده است.

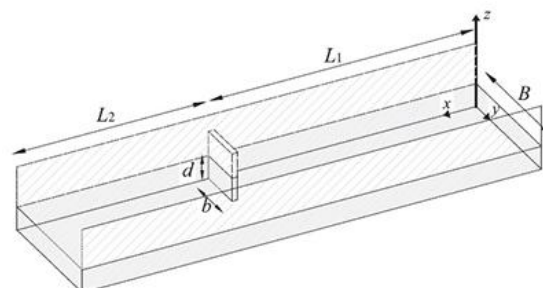


Fig. 3 Laboratory channel used in the numerical model

شکل ۳ آبراهه آزمایشگاهی استفاده شده در مدل عددی

شرایط مرزی در ۶ وجه مکعب حل، به این شرح که برای مرز ورودی Volume Flow Rate، برای مرز خروجی Outflow، برای کف و دیواره‌ها شرط مرزی Wall که به دقت همانند یک دیوار مجازی عمل می‌کند و برای مرز بالایی آبراهه، که با سطح آزاد در تماس است، شرط مرزی فشار به صورت $Pressure = 0$ و $Fluid\ fraction = 0$ اعمال شده است. بایستی یادآوری شود که به دلیل اطمینان از نرسیدن جریان به مرز بالایی شبکه‌ی حل، ارتفاع کل دامنه‌ی محاسبه‌شده برابر $2.5d_0$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ جزئیات مش‌بندی‌های مختلف

Table 2 Details of various meshes

Mesh name	Size of cells in x, y and z directions		
	$\frac{\Delta x}{b}$	$\frac{\Delta y}{b}$	$\frac{\Delta z}{b}$
Large mesh	0.328		
Average mesh	0.197		
Note: For nested mesh, we have 2 blocks, the first block contains the whole domain and the second block covers the $x/b=105$ to $x/b=180$			
Nested	Size of cells in x, y and z directions		
	Block 1:		Block 2:
	$\frac{\Delta x}{b}$	$\frac{\Delta y}{b} = \frac{\Delta z}{b}$	$\frac{\Delta x}{b} = \frac{\Delta y}{b} = \frac{\Delta z}{b}$
	0.184		0.118

حساسیت به شبکه‌بندی همواره یکی از مسئله‌های مهم در مدل‌های عددی بوده است به همین منظور در این تحقیق شبکه‌بندی‌های مختلف، مش بزرگ^۱، مش متوسط^۲ و مش

2 Average Mesh
3 Nested Mesh

1 Large Mesh

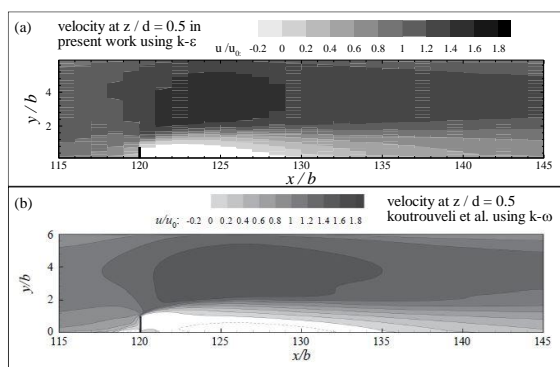


Fig. 5 Velocity contours (a) present work (b) koutrouveli et al. at level $z/d = 0.5$. Greyscale area correspond to positive values, white area to negative values.

شکل ۵ همتراز سرعت در $z/d=0.5$ (a) این تحقیق (b) کوتروولی و همکاران. ناحیه خاکستری به میزان‌های مثبت و ناحیه سفید به میزان‌های منفی اشاره دارد.

۴ نشان داده شد. به عنوان یک نمونه‌ی دیگر، همتراز سرعت در $z/d=0.5$ در شکل ۵ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، طول ناحیه‌ی چرخش که بنابر کار آزمایشگاهی برابر 12b است، هم در این تحقیق و هم در کار پژوهشی koutrouveli et al. (2018) مدل شده‌است.

با توجه به جدول ۳، هدف از شبیه‌سازی سری آبشکن‌ها، دستیابی به فاصله‌ی بهینه میان آنهاست چراکه این فاصله از نظر اقتصادی بر روی پروژه اثر می‌گذارد. به عبارت دیگر هدف دستیابی به فاصله‌ای است که با بیشترین فاصله میان آبشکن‌ها، تنش برشی بزرگ بستر به دلیل ایجاد یک آبراهه پرعمق و قابل کشتیرانی، و تنش

جدول ۳ شبیه‌سازی‌های انجام شده برای سری آبشکن‌ها

Table 3 Simulations performed for series groynes

Simulation	Figure	Purpose of simulation
Single groyne at $x/b=120$.	4 and 5	Validation of the numerical model with experimental measurements in Rajaratnam and Nwachukwu (1983) (case A1).
Three groynes with uniform spacing of $D/b=6$ between them at $x/b=120, 126$ and 132 .	Not shown	
Non-uniform configuration of groynes with spacing of $D/b=1.5$ between the first five and $D/b=6$ between the last four at $x/b=120, 121.5, 123, 124.5, 126, 132, 138, 144$.	6	To find optimum configuration to achieve large bed shear stress and small sidewall shear stress.

جریان بر روش $k-\epsilon$ ارجحیت دارد. از آنجا که هدف اصلی این پژوهش بررسی دیواره‌های طولی اصلاحی می‌باشد و در این نوع جریان، برگشت آب نداریم، لذا در این تحقیق، روش $k-\epsilon$ انتخاب شده‌است.

۳-۲- بررسی عددی کارکرد دیواره‌های طولی اصلاحی در حفاظت از ساحل‌های آبراهه‌ها

در همه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این قسمت که در جدول ۴ مشخص شده‌اند، شرایط اولیه، شرایط مرزی، نوع و اندازه مش‌بندی، ویژگی‌های سیال و ... به دقت برابر با موارد یاد شده در بخش ۲-۳ است. تنها موردی که در شبیه‌سازی‌ها متغیر بوده است، جایگزینی سازه‌ی آبشکن با سازه‌ی دیواره‌ی طولی اصلاحی می‌باشد. به عبارت دیگر کارکرد سازه‌ی آبشکن و سازه‌ی دیواره‌ی طولی اصلاحی در شرایط یکسان با یکدیگر مقایسه گشته است. در حالت

برشی دیواره‌ی کوچک به دلیل محافظت از ساحل، ایجاد شود. مسئله‌ی یاد شده توسط Koutrouveli et al. (2018) انجام شده‌است. بنابر کار آنان بهینه‌ترین پیکربندی سری آبشکن‌ها با توجه به هدف یاد شده، پیکربندی نایکنواختی است که در جدول ۳ مشخص شده و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده‌است. در ادامه‌ی کار از نتایج این پیکربندی، برای مقایسه با نتایج تنش برشی دیواره‌های طولی اصلاحی استفاده شده است تا کارکرد دو سامانه سنجیده و مقایسه شود.

همان‌طور که در آغاز بحث اشاره شد، مسئله‌ی آبشکن توسط Koutrouveli et al. (2018) حل شده‌است. برابر کار انجام شده، هر دو روش $k-\omega$ و $k-\epsilon$ پاسخ‌های قابل قبولی ارائه می‌دهند. در مسئله‌ی آبشکن به دلیل وجود برگشت آب^۱ در جریان، روش $k-\omega$ به دلیل پیش‌بینی عالی جدایی

1 Backwater

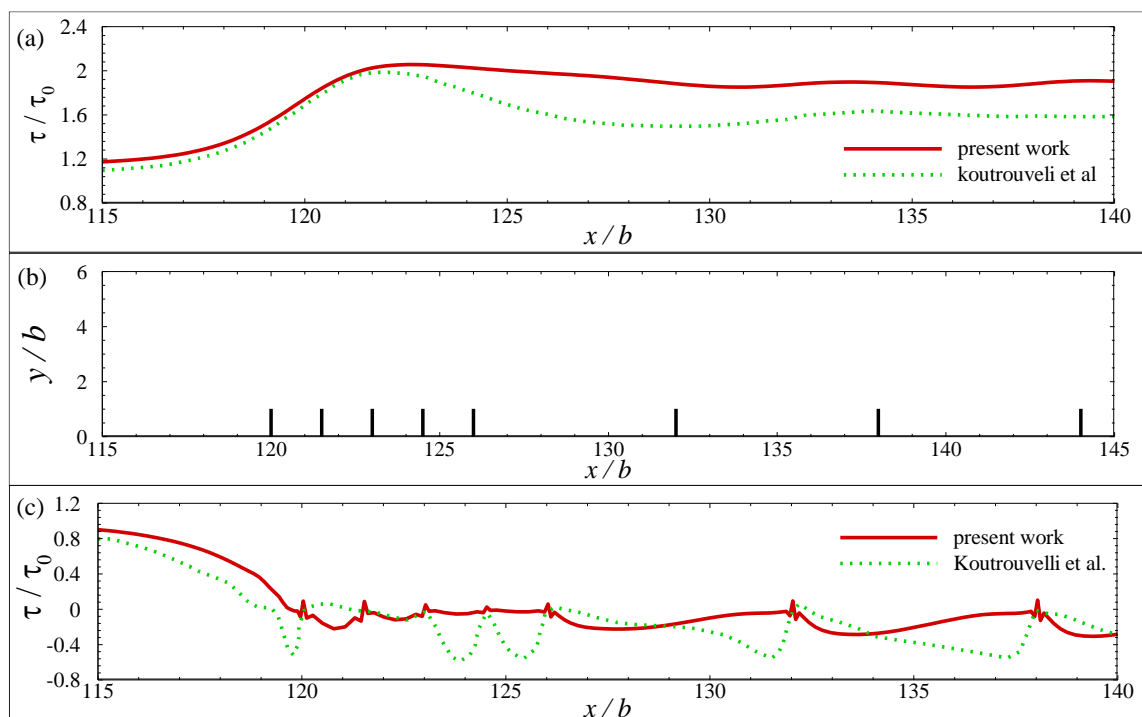


Fig 6 Comparison of shear stress distribution with non-uniform of configuration in the present study using $k-\epsilon$ and Koutrouveli et al. using $k-\omega$: (a) bed shear stress at $y/b=3.5$ (b) groynes locations (c) sidewall shear stress at $z/d=0.5$

شکل ۶ مقایسه تنش برشی سری آبشکن‌ها با پیکربندی نایکنواخت اعمال شده در این بررسی و ارزیابی با کار پژوهشی Koutrouveli et al. (a) تنش برشی بستر (b) موقعیت آبشکن‌ها (c) تنش برشی دیوار

شماره‌ی شبیه‌سازی انجام شده‌است که در شکل‌های قسمت بعدی و همچنین جدول ۵ استفاده شده‌است.

۳-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی‌های دیواره‌های طولی اصلاحی

در جدول ۵ برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های جریان در آبراه اصلی و آبراه فرعی در شبیه‌سازی‌هایی که در جدول ۴ نشان داده شد، آورده شده‌است. ستون اول این جدول، مشخص‌کننده‌ی شماره‌ی شبیه‌سازی است (برای جزئیات بیشتر، جدول ۴ دیده شود). در ستون‌های دوم و چهارم، به ترتیب، نسبت بیشینه سرعت آبراه فرعی به سرعت اولیه و نسبت بیشینه سرعت آبراه اصلی به سرعت اولیه آورده شده‌است. در ستون‌های سوم و پنجم، به ترتیب، بیشینه عدد فرود در آبراه فرعی و بیشینه عدد فرود در آبراه اصلی آورده شده‌است. اطلاعات ستون‌های دوم تا پنجم، برای شبیه‌سازی‌های دیواره‌ی طولی ناممتد، در ابتدا، وسط و انتهای هر دو آبراهه‌های اصلی و فرعی آورده شده‌است تا تأثیر حالت ناممتد به خوبی دیده شود.

ناممتد، از ۵ دیواره‌ی طولی که طول هر کدام $7b$ با فاصله‌ی بین هر دو دیواره‌ی پیاپی $3b$ ، استفاده شده‌است (با توجه به جدول ۱، b طول آبشکن در جهت y است). باید به این نکته اشاره کرد که Le et al. (2018b)، 1.02 شبیه‌سازی مختلف برای سازه‌ی دیواره‌ی طولی اصلاحی و در نقطه‌های آغاز متفاوت به منظور یافتن بهترین نقطه‌ی آغاز دیواره‌ی طولی اصلاحی انجام دادند که در همه‌ی شبیه‌سازی‌ها، الگوی رفتاری پویایی جریان یکسان اما الگوی رفتاری مورفودینامیکی جریان متفاوت بود. در این پژوهش به علت بررسی رفتار پویایی جریان و بررسی نکردن رفتار ریخت‌شناسی، به عنوان مثال رسوب جریان، موقعیت آغاز دیواره‌ی طولی اصلاحی در همه‌ی موقعیت‌های عرضی، $x/b=119$ بوده است.

در جدول ۴، ستون اول نشان‌دهنده‌ی موقعیت عرضی دیواره‌ی طولی است. ستون دوم مشخص می‌کند که دیواره‌ی طولی پوشش‌دهنده‌ی چه طولی در مقایسه‌ی با سری آبشکن‌ها می‌باشد. ستون سوم نقطه‌ی پایان دیواره‌ی طولی را نشان می‌دهد. ستون چهارم نیز بیان‌کننده‌ی

جدول ۴ شبیه‌سازی‌های انجام شده برای دیواره‌های طولی اصلاحی

Table 4 Simulations performed for longitudinal training walls

Note: LTW starting point in all cases were at $x/b=119$.

Continuous Longitudinal Training Walls			
LTW transverse position	LTW equivalent length to a series of groynes	LTW ending point	Simulation No.
y/B=1/2	D/b=6 between three groynes	x/b=133	#1
	D/b=23 between three groynes	x/b=167	#2
	D/b=1.5 between first five groynes and D/b=6 between the last four	x/b=145	#3
y/B=1/3	D/b=6 between three groynes	x/b=133	#4
	D/b=23 between three groynes	x/b=167	#5
	D/b=1.5 between first five groynes and D/b=6 between the last four	x/b=145	#6
y/B=1/6	D/b=6 between three groynes	x/b=133	#7
	D/b=23 between three groynes	x/b=167	#8
	D/b=1.5 between first five groynes and D/b=6 between the last four	x/b=145	#9
Non-Continuous Longitudinal Training Walls			
Note: In this configuration, we have five blocks of the LTW with length $7b=1.0668$ m for each individual block and spacing $3b=0.4572$ m between each individual block.			
y/B=1/2	D/b=23 between three groynes	x/b=166	#10
y/B=1/3	D/b=23 between three groynes	x/b=166	#11
y/B=1/6	D/b=23 between three groynes	x/b=166	#12

جدول ۵ ویژگی‌های جریان در آبراهه‌های اصلی و فرعی در شبیه‌سازی‌های انجام شده

Table 5 Flow characteristics in the main and side channels in the simulations performed

Simulation No.	$\frac{(U_{side})_{max}}{U_0}$	Maximum Fr in side channel	$\frac{(U_{main})_{max}}{U_0}$	Maximum Fr in main channel
#1	1.2	0.21	1.2	0.21
#2	1.2	0.21	1.2	0.21
#3	1.2	0.21	1.2	0.21
#4	1.09	0.19	1.29	0.22
#5	1.09	0.19	1.29	0.22
#6	1.09	0.19	1.29	0.22
#7	0.86	0.17	1.303	0.235
#8	0.86	0.17	1.303	0.235
#9	0.86	0.17	1.303	0.235

Note: For non-continuous Longitudinal Training Walls the values of the Fr, $\frac{(U_{side})_{max}}{V_0}$ and $\frac{(U_{main})_{max}}{V_0}$ are provided beginning, middle and end of the main and side channels so that the effect of this system can be seen further along the channel in both the main and the side channels.

Simulation No.	$\frac{(U_{side})_{max}}{U_0}$			Maximum Fr in side channel			$\frac{(U_{main})_{max}}{U_0}$			Maximum Fr in main channel		
	Beg	Mid	End	Beg	Mid	End	Beg	Mid	End	Beg	Mid	End
#10	1.27	1.27	1.27	0.245	0.245	0.245	1.27	1.27	1.27	0.245	0.245	0.245
#11	1.21	1.1	1.06	0.21	0.18	0.21	1.2	1.27	1.35	0.23	0.24	0.245
#12	0.97	0.72	0.48	0.18	0.16	0.13	1.2	1.27	1.35	0.22	0.23	0.238

عامل اثرگذار بر تنش، موقعیت عرضی این سازه می‌باشد

بررسی هر دوازده شبیه‌سازی جدول ۵، نشان می‌دهد که

بررسی ستون‌های دوم و چهارم، و ستون‌های سوم و پنجم، جدول ۵ نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی ۱۲# و در قسمت آبراهه کناری به علت نزدیک بودن دیواره‌های طولی اصلاحی به دیواره‌ی آبراهه که باعث ورود دبی بسیار کمتر به آن قسمت می‌شود و همچنین افت انرژی‌های پی‌درپی جریان در ابتدا و انتهای هر دیواره، وضعیت جریان به تدریج و با طی مسافت در طول آبراهه، به میزان قابل توجهی نسبت به مابقی شبیه‌سازی‌ها آرام می‌شود. بنابراین به دلیل رابطه‌ی مستقیم میان تغییر پذیری‌های سرعت و تنش برشی، تنش برشی هم در بستر آبراهه فرعی و هم در دیواره‌ی آبراهه در شبیه‌سازی ۱۲# کوچکتر از حالت‌های پیش است که هدف‌های محافظت از ساحل و کمک به محیط زیست را محقق می‌سازد (شکل ۸-ج)؛ درحالی که در قسمت آبراهه اصلی شبیه‌سازی یاد شده، جریان به سرعت حدی خود می‌رسد و توسعه کامل می‌یابد و هدف کشتیرانی را محقق می‌سازد (شکل ۸-ا).

به این معنی که هرچه دیواره‌ی طولی اصلاحی به دیواره‌ی آبراهه نزدیک‌تر باشد، محافظت بهتری از دیواره‌ی آبراهه صورت می‌پذیرد؛ چراکه در قسمت آبراهه فرعی با یک وضعیت آرام با نوسان‌های کمتر سرعت، روبرو می‌شویم (هرچه موقعیت عرضی به دیواره‌ی آبراهه نزدیک‌تر باشد، عدد فرود آبراهه فرعی کوچک‌تر می‌شود). از سوی دیگر، این آرام شدن وضعیت در آبراهه کناری باعث می‌شود که تنش کاهش یافته و در نتیجه، فرسایش در دیواره شدید نباشد (شکل ۷).

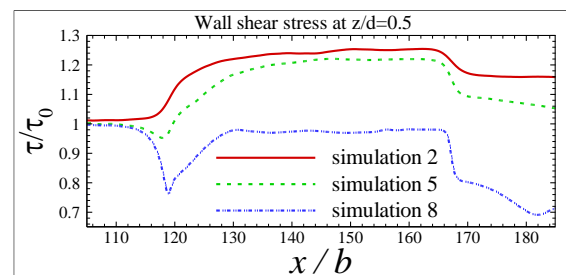


Fig.7 The role of the transverse position of the LTW

شکل ۷ نقش موقعیت عرضی سازی LTW

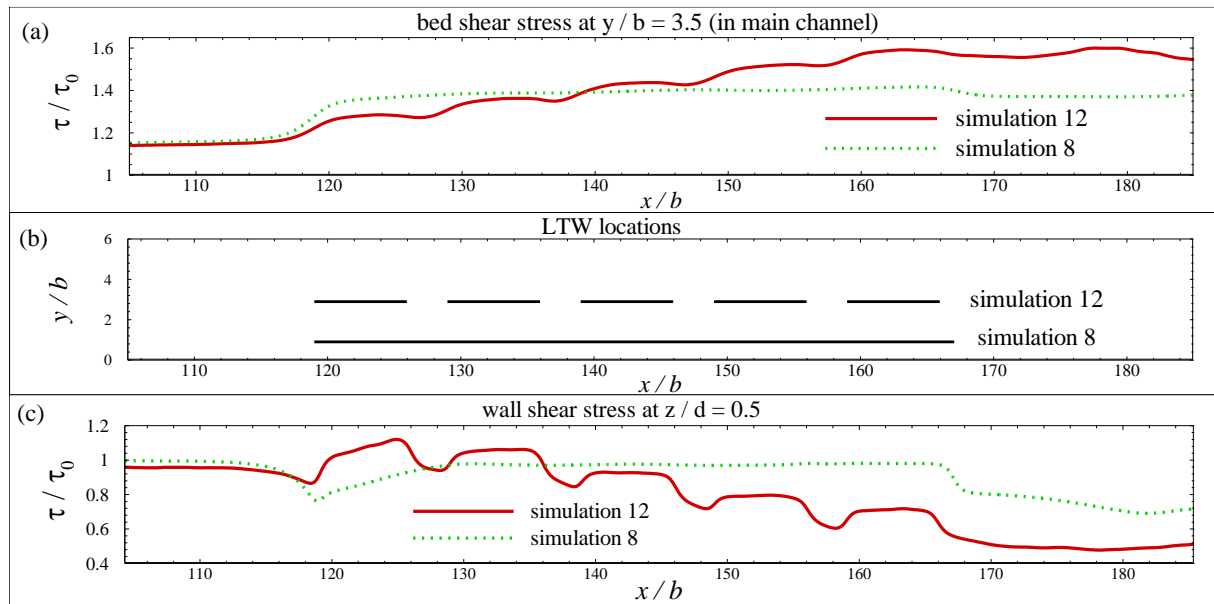


Fig.8 The effect of non-continuous longitudinal training walls on: (a) bed and (c) wall shear stresses. (b) Longitudinal training walls locations

شکل ۸ تأثیر ممتد نبودن دیواره‌ی طولی اصلاحی بر (a) تنش برشی بستر (b) تنش برشی دیواره (c) پیکربندی دیواره‌های طولی

تنها در صورتی که موقعیت عرضی بتواند در آبراهه جانبی وضعیت آرام را ایجاد کند، دیواره‌های ناممتد باعث کاهش بیشتر تنش نسبت به دیواره‌های ممتد خواهند شد و محافظت بهتری از دیواره‌ی آبراهه صورت خواهد پذیرفت.

بایستی یادآوری کرد، همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده‌است، موقعیت عرضی دیواره‌های طولی اصلاحی در مقایسه با ناممتد بودن این سازه، اثرگذاری بیشتری را بر افزایش یا کاهش تنش برشی، ایفا می‌کند. به این معنی که

دیواره‌ی طولی اصلاحی ضمن برآورده کردن هدف کشتیرانی، تنش برشی کمتری را در مقایسه‌ی با سری آبشکن‌ها به بستر وارد می‌کند (تنش برشی بستر در سامانه آبشکن، $2 \approx \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|$ است و در سامانه دیواره‌ی طولی اصلاحی، پس از طی مسافتی به $1.6 \approx \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|$ می‌رسد و روی این میزان ثابت باقی می‌ماند).

همان طور که در شکل ۱۰-۱۰ مشخص است، سازه‌ی دیواره‌ی طولی اصلاحی ضمن کمک به محیط زیست از طریق فراهم آوردن یک جریان با وضعیت آرام در آبراهه فرعی و بهبود انتقال اضافه دبی سیلاب، می‌تواند حتی موفق‌تر از سامانه آبشکن در کنترل تنش برشی وارد به دیواره، عمل کند (تنش برشی دیواره در سامانه آبشکن، $0.6 \approx \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|$ است و در سامانه دیواره‌ی طولی اصلاحی، پس از طی مسافتی به $0.45 \approx \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|$ می‌رسد و روی این میزان ثابت باقی می‌ماند).

قابل یادآوری است که نتایج پیکربندی نایکنواخت در کار Kotrouli et al. (2018) تنها تا $x/b=140$ ارائه شده است.

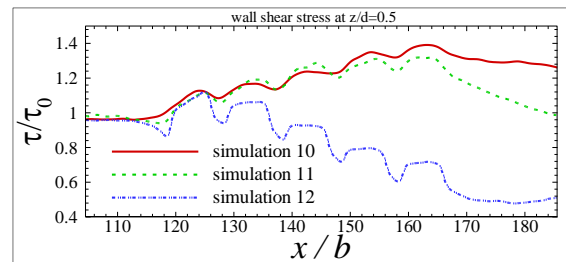


Fig. 9 The role of the transverse position of the LTW
شکل ۹ نقش موقعیت عرضی سازه‌ی LTW

۳-۳- مقایسه‌ی سازه‌ی آبشکن با سازه‌ی دیواره‌ی طولی اصلاحی از منظر تنش برشی

در این بخش به مقایسه‌ی کارکرد بهینه‌ترین پیکربندی سری آبشکن‌ها و کارکرد دیواره‌های طولی اصلاحی برای دستیابی به تنش برشی بزرگ بستر به دلیل ایجاد یک آبراهه پرعمق و قابل کشتیرانی، و تنش برشی دیواره‌ی کوچک به دلیل محافظت از ساحل، پرداخته شده‌است. پیکربندی‌های یاد شده در شکل ۱۰-۱۰، مشخص شده‌است.

همان طور که در شکل ۱۰-۱۰ مشخص است، سازه‌ی

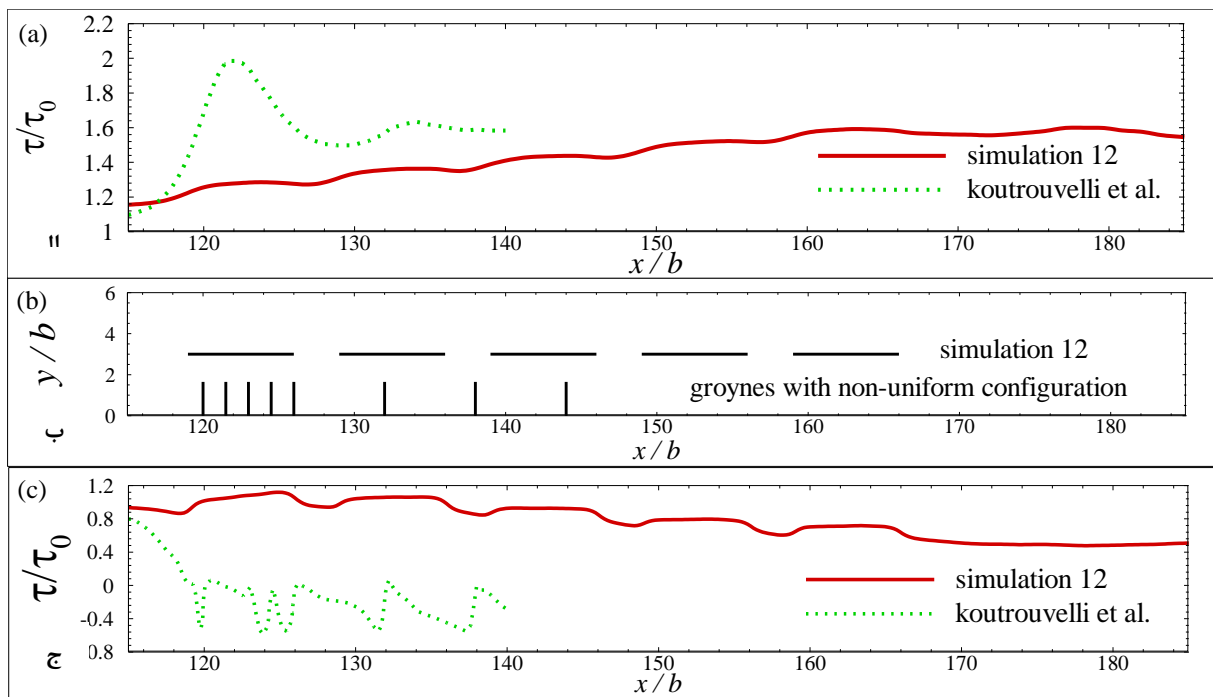


Fig. 10 Comparison of shear stress distribution using longitudinal structures in the present study with the method of using traditional groynes of Kotrouli et al: (a) bed shear stress at $y/b=3.5$ (b) groynes and LTW locations (c) sidewall shear stress at $z/d=0.5$

شکل ۱۰ مقایسه تنش برشی روش استفاده‌ی از سازه‌های طولی در این تحقیق با روش استفاده‌ی از آبشکن‌های سنتی تحقیق Kotrouli et al (a) تنش برشی بستر در $y/b=3.5$ (b) پیکربندی آبشکن‌ها و دیواره‌های طولی اصلاحی (c) تنش برشی دیواره در $z/d=0.5$

۴- نتیجه گیری

کاربرد سازه‌های دیواره‌های طولی اصلاحی از چندی پیش توسط محققان به منظور بهبود کارکرد محیط زیست، عبور جریان بیشتر در زمان سیلاب و افزایش ایمنی، بهبود عمق آب برای هدف‌های کشتیرانی و برش کمتر در بستر رودخانه به جای سازه‌های سنتی آبشکن توصیه شده‌است. در این تحقیق کارکرد این سامانه جدید از منظر تنش برشی ارزیابی شده و نتایج زیر به دست آمده است:

الف- سامانه دیواره‌ی طولی اصلاحی در مقایسه‌ی با آبشکن، ضمن برآورده کردن هدف‌های کشتیرانی، تنش برشی کوچکتری را به بستر رودخانه وارد می‌کند و در نتیجه منجر به فرسایش کمتری در بستر رودخانه می‌شود. ب- این سامانه، آنچنان انعطاف پذیری برای محافظت از دیواره‌ی ساحل دارد که افزون بر موثر بودن به همان اندازه‌ی سامانه آبشکن، این قابلیت را ایجاد می‌کند که بسته به نیاز و شرایط محیط، این سامانه، به صورت ممتد یا ناممتد، در موقعیت عرضی و طول مورد نیاز، برنامه‌ریزی و اجرا شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	عرض آبراهه (m)
b	طول آبشکن (m)
beg	ابتدای آبراهه‌های اصلی و فرعی (-)
d	عمق اولیه (m)
end	انتهای آبراهه‌های اصلی و فرعی (-)
Fr	عدد فرود
g_i	شتاب گرانش در سه جهت (m/s^2)
k	انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2)
$L=L_1+L_2$	طول کل آبراهه (m)
mid	وسط آبراهه‌های اصلی و فرعی (-)
p	فشار (Pa)
Q	دبی (m^3/s)
Re	عدد رینولدز
s_o	شیب طولی آبراهه
u_o	سرعت اولیه (m/s)
u'_i	سرعت‌های نوسانی در سه جهت (m/s)
u_i	سرعت‌های در سه جهت (m/s)

x_i	محورهای سه جهت
Δx	ابعاد مش در جهت x (m)
Δy	ابعاد مش در جهت y (m)
Δz	ابعاد مش در جهت z (m)

نشانه‌های یونانی:

τ_o	تنش برشی اولیه (Pa)
τ_{ij}	تنش‌های برشی (Pa)
δ_{ij}	تابع دلتای کرونکر (-)
ν_t	لزجت گردابه‌ای (m^2/s)
ρ	چگالی آب (kg/m^3)
γ	وزن مخصوص (N/m^3)

زیر نویس‌ها:

i	مشخص کننده‌ی جهت مختصاتی
j	مشخص کننده‌ی جهت مختصاتی
main	مشخص کننده‌ی آبراهه اصلی
side	مشخص کننده‌ی آبراهه فرعی

۶- منبع‌ها

- Collas, F.P.L., Buijse, A.D., van den Heuvel, L., van Kessel N., Schoor, M.M., Eerden, H. and Leuven R.S.E.W. (2018). Longitudinal training dams mitigate effects of shipping on environmental conditions and fish density in the littoral zones of the river Rhine, Science of the Total Environment, 619–620, 1183– 1193.
- De Ruijsscher, T.V., Vermeulen, B. and Hoitink, A.J.F. (2020). Diversion of flow and and sediment toward a side channel separated from a river by a longitudinal training dam. Water Resources Research, 56(6), e2019WR026750.
- FLOW-3D® Version 11.2 Users Manual (2016). FLOW-3D [Computer software]. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>
- Koutrouveli, T.I., Dimas, A.A., Fourniotis, N.T. and Demetrapoulos, A.C. (2019). Groyne spacing role on the effective control of wall shear stress in open-channel flow, Journal of Hydraulic Research, 57(2), 167–182.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2), 269–289.
- Le, T.B. (2018). Training rivers with longitudinal walls: A long-term morphological responses, PhD

- Mosselman, E. (2020). Studies on river training. *Water*, 12(11), 3100.
- Osorio, A.L.N.A., Mosselman, E., Franca, M. and Creech, C. (2020). Longitudinal training walls on the Waal River (Netherlands) as a River training alternative, XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Brazil.
- Radspinner, R.R. and Diplas, P. (2010). Review of “River Training and Sediment Management with Submerged Vanes” by A. Jacob Odgaard, *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 90–91.
- Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B.A. (1983). Flow near Groin-Like Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 463–480.
- Yossef, M.F.M. (2002). The Effect of Groynes on Rivers: Literature review, Available at: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ab9545ba7-2423-4c20-ace2-0e1cd799d18a>.
- Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Delft University of Technology, 137p.
- Le, T.B., Crosato, A. and Uijttewaal, W.S.J. (2017). Longitudinal training walls: optimization of river width subdivision, NCR-Days, Wageningen, Netherlands.
- Le, T.B., Crosato, A. and Uijttewaal, W.S.J. (2018a). Long-term morphological developments of river channels separated by a longitudinal training wall, *Advances in Water Resources*, 113, 73–85.
- Le, T.B., Crosato, A., Mosselman, E. and Uijttewaal, W.S.J. (2018b). On the stability of river bifurcations created by longitudinal training walls: Numerical investigation, *Advances in Water Resources*, 113, 112–125.
- Menter, F. (1993). Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, Orlando, Florida, U.S.A.