

Numerical investigation of the change of the cross-section dimensions of the river regime under the condition of bankfull and overbank flow in compound sections

Amirsajad Maleki^{1*}, Golamreza Azizyan², Seyed Arman Hashemi Monfared²

¹M.Sc. Graduated, Department of Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty Shahid Nikbakht, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran

Corresponding Author's E-mail: malekiamirsajad@gmail.com

Received: 01 June 2023
Accepted: 19 Dec. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Floods are natural events that cause significant morphological changes in riverbeds and adjacent lands. Therefore, predicting the process of river changes under overbank flows is one of the important issues in river engineering. Conducting laboratory studies, in addition to time, requires high cost and accuracy, so using a numerical and analytical model is more reliable and requires less cost due to providing accurate results. In this study, the behavior and hydraulic geometry of the trapezoidal compound channel have been investigated using MIKE 21 software for the type of bankfull and overbank flow. First, the compound trapezoidal channel section with erodible boundaries was developed under bankfull flow, and then the behavior and geometry of the developed trapezoidal channel were evaluated under overbank flows. The results showed that when the cross-section of the channel is full of water, there was no significant change in the width of the main channel, but the width of the main channel in overbank flows is higher than the full section and increases rapidly. The mean relative differences obtained at the upstream and downstream width of the trapezoidal section and flow depth are 0.96, 0.88, and 0.98, respectively. The width, depth, and sediment concentration values predicted by the above software are better estimated than those of stable channel design methods such as Brownlie, Van Rijn, and WBP.

Keywords: Regime cross-section, Flood plain, Compound channel, MIKE 21.

Introduction: Floods are one of the natural events that cause significant morphological changes in riverbeds and adjacent lands, which result in financial, human, and other losses. A flood occurs when the water level rises above the main section of the river, and the water enters the flood plains. In such a situation, the section of the river or channel is called a compound section. When a flood occurs, the interference of the flow in the main channel and the flood plain in the compound channel causes momentum transmission and complexity in the flow pattern. Due to the dynamic nature of these events, statistical, experimental, and semi-experimental criteria are used to determine the dimensions of stable regime channels. Nowadays, the use of two-dimensional models to study the behavior of the regime channels has a superior advantage over the empirical and theoretical approaches, which are based on one-dimensional. Despite the redundancy of experimental studies, there have been only a few numerical studies on the flow pattern and sediment transport in alluvial channels. In this study, the behavior and hydraulic geometry of the trapezoidal compound channel have been investigated using MIKE 21 software for the type of bankfull and overbank flow.

Methodology: In this study, the flow in a rectangular channel was simulated using MIKE 21 software. This channel has been studied in a laboratory at the University of Newcastle, England. It consists of two floodplains and a main channel (river model) and has an erodible bed, Fig. 2. The channel is 2.5 meters wide and 22 meters long, of which 18 meters are filled with sand to a depth of 0.6 meters. The median diameter of its particles is 0.1 mm \approx D50 (Haidera, 2002).

To study the behavior of the main channel during the flood flow, the flow is adjusted in such a way that the flood zones are on the threshold of water intake. This work led to measuring the intensity of sediment transfer only in the main channel during the flood, and erosion will not happen in the flood zones. Table 1 shows the basic information of modeled channels of bankfull flow predicted by the WBP method (Haidera, 2002).

The hydrodynamic module of MIKE 21 software was used for simulation. This module is used in a wide range of hydraulics and related phenomena. It uses the obtained output results as input for other MIKE 21 modules, such as the sediment transport-spreading module (MIKE 21 User's Manual, 2014). Figs. 3 and 4 show a view of the 2D channel model created in Mesh Generator and the mesh applied, respectively.

To evaluate the results obtained from the MIKE 21 model with laboratory data, four statistical methods, including Correlation Coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Difference (DR), and Average Absolute Value Of Relative Errors (MARE), have been used.

Results and Discussion: The comparison of the obtained results shows that among the three sediment transport equations of England and Hansen, Van Rijn, and Meer-Pieter Muller that are available in the MIKE 21 software, the England-Hansen sediment transport equation estimates the channel dimension parameters with the highest correlation coefficient of 0.95.

Among the six examined channels (Table 1), three channels (Table 2) were used for verification, and the others (Table 4) were used for validation. The results reveal that the model can estimate the geometric parameters of the channel well in both stages (Tables 3 and 5).

When the cross-section of the canal is full of water (first state), there is no significant change in the main channel width, but in overbank currents, the width of the main canal is bigger than it is in the first state and increases rapidly.

Average cross-section changes at the distances of 6, 11, and 13 meters from the beginning of the channel for the developed channel (Fig. 7) show that during the flood flow, the channel cross-section estimated by the model is close to the observational cross-section. Changes in sediment and cross-sectional concentrations in the laboratory model after the first 6 hours of the water flow are negligible and have reached stable conditions, while in the mathematical model, after 3 hours, the channel's width rate decreases and eventually reaches stability. This indicates more changes by simulation.

Conclusion: A stable alluvial channel with a bankfull, when subjected to flooding, tilts towards a new stable channel. Also, the width, depth, and sediment concentration values predicted by the above software are better estimated than those of stable channel design methods such as Brownlie, Van Rijn, and WBP.

© 2022 University of Zabol, Zabol, 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/>)

مطالعه عددی تغییر ابعاد مقطع رژیم رودخانه در شرایط مقطع پر و بالاتر از تراز لبریز در مقاطع مرکب

امیرسجاد ملکی^{۱*}، غلامرضا عزیزیان^۲، سید آرمان هاشمی منفرد^۲

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان ایران
^۲دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: malekiamirsajad@gmail.com

وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

چکیده: سیلاب یکی از حوادث طبیعی است که باعث تغییرات چشم‌گیر ریخت‌شناسی در بستر رودخانه‌ها و اراضی مجاور آن‌ها می‌شود؛ از این رو پیش‌بینی روند تغییرات رودخانه‌ها تحت جریان‌های سیلابی از موضوعات مهم در مهندسی رودخانه است. انجام مطالعات آزمایشگاهی علاوه بر زمان زیاد به هزینه و دقت بالایی نیاز دارد. از سوی دیگر استفاده از یک مدل عددی و تحلیلی به دلیل ارائه نتایج دقیق، از اعتبار بیشتری برخوردار است و هزینه کم‌تری نیز می‌طلبد. در این تحقیق، رفتار و هندسه کلنال دوزنقه‌ای مرکب با استفاده از مدل عددی MIKE 21، در شرایط مقطع پر و بالاتر از تراز لبریز بررسی شده است. ابتدا مقطع کانال دوزنقه‌ای مرکب با مرزهای فرسایش‌پذیر تحت جریان مقطع پر براساس روش WBP توسعه داده شد. سپس، رفتار و هندسه کانال دوزنقه‌ای توسعه‌یافته تحت جریان سیلابی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد هنگامی که مقطع کانال پر است، تغییر قابل توجهی در عرض کانال اصلی ایجاد نمی‌شود، اما عرض کانال اصلی برای جریان‌های سیلابی نسبت به مقطع پر به سرعت افزایش می‌یابد. متوسط اختلاف نسبی به دست آمده عرض بالا و پایین مقطع دوزنقه‌ای و عمق جریان به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۸۸ و ۰/۹۸ است. همچنین، مقادیر عرض، عمق و غلظت رسوب پیش‌بینی شده کانال توسط MIKE 21 نسبت به روش‌های طراحی کانال پایدار نظیر برونلی، ون‌راین و WBP بهتر تخمین زده شده است.

کلیدواژه‌گان: مقطع رژیم کانال‌ها، سیلاب‌دشت، کانال مرکب، MIKE 21.

۱- مقدمه

اصلی رودخانه بالا رفته و وارد دشت‌های سیلابی گردد. در چنین شرایطی مقطع رودخانه یا کانال را مقطع مرکب می‌نامند (Yang & Knight., 2007). مقاطع مرکب از ترکیب مقطع اصلی و دشت‌های عریض سیلابی تشکیل شده است. از جمله کاربردهای مقاطع مرکب در کانال‌های سیلاب‌بر،

مطالعه سیلاب به علت خسارت‌های فراوان جانی و مالی، همواره مورد توجه پژوهشگران است. بررسی بستر سیلابی می‌تواند راهکارهای مناسبی برای کاهش این پدیده در اختیار مدیران و پژوهشگران قرار دهد (Arab & Esmaili, 2021). سیل زمانی رخ می‌دهد که تراز سطح آب از مقطع

است. مدت زیادی از فهمیدن این حقیقت که یک کانال آبرفتی، هر سطح مقطعی که بشر یا طبیعت برای آن در نظر گرفته را نمی‌پذیرد، بلکه جریان، اقدام به ایجاد کانال به-خصوصی با اصلاح مشخصات هندسی می‌نماید که این مشخصات در طولانی‌مدت توسط جریان، تغییری نمی‌یابد. با توجه به این امر، مشخصات رژیم، مورد توجه محققین است؛ زیرا کانال رژیم به کمترین حفاظت و در نتیجه هزینه-های کمتری برای نگهداری نیازمند است (Razzaghi & Hajikandi, 2010). با بروز سیل و وارد شدن آب به دشت-های سیلابی در یک کانال آبرفتی، مقطع کانال از حالت ساده به شکل مرکب تبدیل شده تا از افزایش عمق جریان سیلابی جلوگیری نماید. به همین ترتیب با کاهش تراز سیلاب و ایجاد اختلاف سرعت در مرز پیوند میان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، اصطکاک زیادی در اثر برهم‌کنش جریان ایجاد می‌شود که به دنبال آن فرم بستر، پایداری دینامیکی و عملکرد هیدرولیکی پیچیده‌تری خواهد داشت. بنابراین پیش‌بینی مقطع اصلی کانال که بیشتر آن‌ها طی سال‌های طولانی تحت جریان‌های سیلابی مختلف به حالت پایدار رسیده‌اند یکی از مهم‌ترین مباحث در مهندسی رودخانه است.

به منظور انتخاب نرم‌افزار مناسب ویژگی‌های اصلی، معادلات حاکم و محدودیت‌های مشترک، مدل‌های عددی HEC-RAS، CCHE2D و MIKE 21 برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه آبرفتی مورد بررسی قرار گرفتند.

مقاطع لایروبی رودخانه، کانال‌های انتقال آب و طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی است (Gholinejad et al., 2013).

پیش‌بینی مقطع پایدار یا رژیم در یک کانال، یکی از موضوعات مهم در طراحی کانال‌های آبیاری و بهسازی رودخانه‌های آبرفتی است. رژیم یک کانال یا رودخانه به صورت دینامیک است و برای بیان هندسه مقطع کانال در حالت رژیم می‌توان یک کانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای که در مواد آبرفتی تشکیل شده است، را تصور کرد. در ابتدا مرزهای کانال، سطح و فرم مقطع دوزنقه‌ای را دارند، ولی بعد از گذشت زمان و قرار گرفتن در شرایط دبی‌های جریان مختلف، مرز کانال در اثر انتقال رسوب توسط جریان، دچار تغییراتی می‌شود. به طوری که بستر کانال در اثر رسوب-گذاری، به صورت تل‌های رسوبی و حالتی از موج را ایجاد می‌کند و دیواره‌های کانال در اثر فرسایش، حالت منحنی به خود می‌گیرد (Farias et al., 1998). شکل ۱ این فرآیند را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

یک کانال آبرفتی پایدار، عمق، عرض و شیب خود را به نحوی تنظیم کرده و تغییر می‌دهد که میان رسوب ورودی و خروجی از کانال و شدت جریان، تعادل برقرار شود. در این صورت کانال به شرایط رژیم (تعادلی) رسیده است (Shaghghi Khajedehi, 2017). از عوامل برهم‌زننده تعادل، شدت جریان، رسوب ورودی و خروجی به رودخانه‌ها و تغییر در رفتار و ریخت‌شناسی رودخانه، وقوع سیلاب

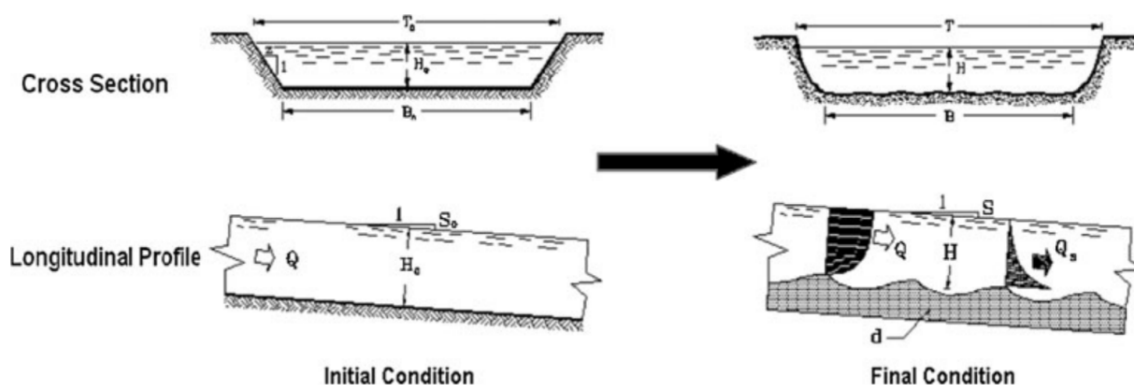


Fig. 1 Schematic of the channel section in initial conditions and in steady state or regime (Tahershamsi et al., 2012)

شکل ۱ شماتیک مقطع کانال در شرایط اولیه و در حالت پایدار یا رژیم (Tahershamsi et al., 2012)

بیشتری برخوردار است و هزینه کم‌تری می‌طلبد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- کانال مورد مطالعه

کانال مورد مطالعه که نتایج آن در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است در دانشگاه نیوکاسل انگلستان به صورت دوزنقه‌ای شکل بوده است. این کانال متشکل از دو پهنه سیلابی و یک کانال اصلی (مدل رودخانه) می‌باشد و دارای بستر فرسایش‌پذیر مطابق شکل ۲ است. این کانال به طول ۲۲ متر و عرض ۲/۵ متر بوده که ۱۸ متر از طول آن با ماسه به عمق ۰/۶ متر پر شده و قطر میانه ذرات آن $D_{50} \approx 1/0$ است. ۴ متر باقیمانده در طول کانال به دو مخزن، یکی در ابتدای کانال و دیگری در انتهای آن تقسیم و توسط یک لوله به یکدیگر متصل می‌شود. عمق قابل فرسایش کانال ۰/۶ متر و همچنین محدوده قابل فرسایش در عرض آن نیز بین ۰ تا ۲/۵ متر است (Haidera, 2002).

یک پمپ با دو لوله ورودی، یکی آب زلال و دیگری آب و رسوب را از مخزن انتهایی به ورودی کانال پمپ می‌نماید. دبی جریان نیز توسط یک شیرفلکه و دبی‌سنج مغناطیسی متصل به کامپیوتر تنظیم می‌شود. همچنین از سرریزهای قابل تنظیم به منظور کنترل سطح آب در کانال، استفاده شده است. به منظور اتلاف انرژی آب و جلوگیری از آب‌شستگی، در بخش ورودی کانال از یک شبکه لانه‌زنبوری استفاده شده و ۰/۵ متر اولیه ورودی به وسیله شن‌هایی با دانه‌بندی درشت پوشانده شده است. رسوبات انتقالی توسط جریان نیز در پایین‌دست کانال با یک صافی جمع‌آوری و اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱ شماتیک پلان و نمای جانبی کانال را نشان می‌دهد (Haidera, 2002).

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک پروفیسور نواک دانشگاه نیوکاسل انگلستان در دو مرحله A و B انجام شده است. در مرحله A، مقطع طراحی شده به روش WBP با جریان مقطع پر و شیب بستر ۰/۰۰۱۷ توسعه یافت. سپس، جریان سیلابی در کانال توسعه‌یافته با دبی اوج ثابت (سری دوم B) با شیب ۰/۰۰۲ برقرار گردید. از این رو یکی از مشخصه‌های

انتخاب مدل مناسب برای یک رودخانه، بستگی به هدف مطالعه، ویژگی رودخانه، نوع مشکل، توانایی مدل برای شبیه‌سازی موثر مسئله، در دسترس بودن داده‌ها برای کالیبراسیون مدل و زمان دارد. به‌طور معمول مدل‌های رسوبی یک‌بعدی در مقیاس منطقه‌ای یا رودخانه‌ای اعمال می‌شوند، در حالی که مدل‌های دوبعدی در مقیاس محلی استفاده می‌گردند (Dhakal et al., 2021).

در سال ۲۰۲۱ متغیرهای مقطع عرضی در کانال‌های آبرفتی مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن آب و رسوب، کانال آبرفتی خود را برای رسیدن به حالت تعادل پایدار یا رژیم تنظیم کرده که مشخصات هندسی شامل عرض، عمق و شیب کانال را تشکیل می‌دهد. با مطالعه انتقال بار بستر و تبدیل توان جریان در یک جریان دائمی و یکنواخت می‌توان دریافت که تمام متغیرهای مقطع عرضی از لحاظ نظری توسط دبی، طول جابجایی رژیم رسوب و تبدیل انرژی از توان جریان به انرژی آشفتگی تعیین می‌شوند (Fan et al., 2021).

به دلیل دینامیکی بودن این وقایع از معیارهای آماری، تجربی و نیمه‌تجربی به‌منظور تعیین ابعاد کانال‌های آبرفتی پایدار رژیمی استفاده می‌گردد. حال اگر یک کانال آبرفتی پایدار در معرض جریان مقطع پر و بالاتر از تراز لبریز قرار گیرد، هیدرولیک جریان و رفتار کانال ممکن است پرسش‌هایی برای مهندسان ایجاد نماید. پژوهش آزمایشگاهی، (Haidera, 2002)، درباره پایداری کانال‌های آبرفتی تحت جریان‌های سیلابی بر روی کانال‌های فرسایش‌پذیر نشان می‌دهد زمانی که یک کانال آبرفتی مستقیم پایدار با جریان مقطع پر، تحت شرایط جریان سیلابی قرار گیرد، با گسترش خود یک رژیم جدید ایجاد می‌کند تا به تعادل برسد.

پژوهش حاضر در ادامه کار این محقق با شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال رسوب در مقاطع مرکب با استفاده از مدل عددی MIKE 21، به بررسی مقاطع رژیم بر اثر عبور سیلاب و جریان لبریز می‌پردازد. انجام مطالعات آزمایشگاهی علاوه بر زمان به هزینه و دقت بالایی نیاز دارد که در اکثر موارد راه حل مناسب و مقدوری نیست؛ بنابراین استفاده از یک مدل عددی و تحلیلی به دلیل ارائه نتایج دقیق، از اعتبار

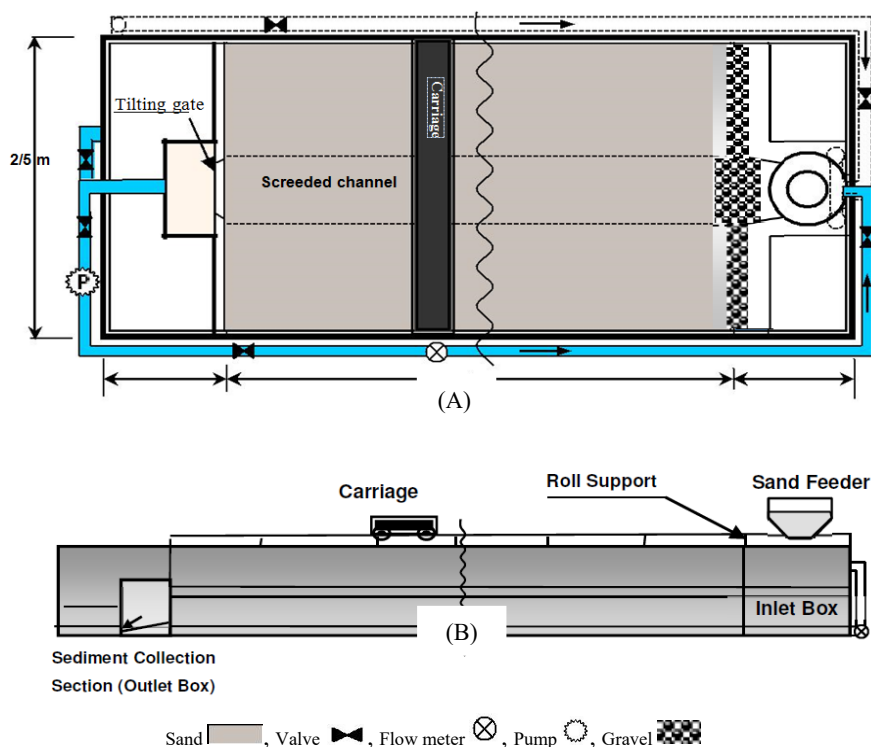


Fig. 2 A) Laboratory channel B) The Side view of the channel (Haidera, 2002)
 شکل ۲ الف) کانال آزمایشگاهی ب) نمای جانبی کانال (Haidera, 2002)

دارای جریان سیلابی که به آن کانال مرکب نیز گفته می- شود با مرزهای متحرک تقریباً متفاوت از مرزهای ثابت است. به عنوان مثال، رابطه بین دبی جریان و ارتفاع آب در روی پهنه‌های سیلابی را می‌توان با افزایش دبی در کانال مرکب مطالعه نمود. در حالی که در یک کانال آبرفتی جریان سیلابی با افزایش میزان دبی، شکل کانال اصلی تغییر می- یابد. از این رو تعدادی آزمایش با دبی‌های ۲ تا ۶ لیتر بر ثانیه اجرا گردید که در جریان مقطع پر، عموماً مقطع اصلی این کانال‌ها به وسیله فرضیه WBP پیش‌بینی شد و به عنوان مقطع اولیه‌ای در جریان‌های سیلابی با دبی‌های ۱۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

برنامه کامل آزمایش‌ها برای جریان مقطع پر در جدول ۱ ارائه گردیده است که به عنوان مقطع عرضی اولیه برای آزمایش‌ها در کانال اصلی در نظر گرفته می‌شود (Haidera, 2002).

اصلی کانال پایدار، داشتن بستر متحرک^۱ است که در آن فرسایش یا رسوب‌گذاری اتفاق نمی‌افتد (Chang, 1985). در هر دو سری از آزمایش‌ها، کانال اصلی به صورت دوزنقه‌ای مرکب با جداره‌های فرسایش‌پذیر و هموار به طور مستقیم ساخته شد. برای سیلاب‌دشت نیز از همان مصالح رسوبی استفاده شد.

۲-۲- توصیف شرایط آزمایشگاهی

جهت مطالعه رفتار کانال اصلی در جریان سیلابی، جریان به صورتی انتخاب گردیده است که پهنه‌های سیلابی در حالت قبل از آستانه حرکت قرار داشته باشند. این کار منجر به اندازه‌گیری شدت انتقال رسوب صرفاً در کانال اصلی و در زمان سیلابی شدن جریان شده و فرسایشی در پهنه‌های سیلابی اتفاق نخواهد افتاد. مطالعه هیدرولیک کانال‌های

^۱ Movable Bed

جدول ۱ اطلاعات اولیه کانال‌های مدل‌سازی شده جریان مقطع پر پیش‌بینی شده به وسیله روش WBP (Haidera, 2002)

Table 1 Basic information of modeled channels of bankfull flow predicted by the WBP method (Haidera, 2002)

Lab. Tests		Discharge	Bed Slope	Bottom Width	Side slope	Depth	Top Width
Series	Number	Q (l/s)	S	B (mm)	z	d (mm)	B (mm)
A	A1	5	0.0017	300	1	45	390
	A2	6	0.0017	300	1	47	394
	A3	4	0.0017	220	1	41	302
B	B1	2	0.002	300	1	41	382
	B2	4	0.002	260	1	38	336
	B3	6	0.002	300	1	47	394

نتایج به دست آمده از اجرای مدل هیدرودینامیکی است. این مدل در محدوده‌ی گسترده‌ای از هیدرولیک و پدیده‌های مرتبط با آن کاربرد داشته و نتایج خروجی به دست آمده را به عنوان ورودی برای دیگر مدل‌های MIKE 21 نظیر مدل انتقال-پخش رسوب استفاده می‌کند (MIKE 21 User's Manual, 2014).

در راستای مدل‌سازی، شرایط توپوگرافی و شکل کانال، وارد محیط نرم‌افزار MIKE 21 گردید. در همین راستا برای محدوده مورد مطالعه، جهت بالا بردن دقت مکانی و استخراج نتایج از برنامه MIKE Zero و با به کارگیری شبکه‌بندی نامنظم Mesh Generator استفاده شد. شکل ۳ نمایی از کانال ایجاد شده در Mesh Generator را نشان می‌دهد.

۲-۴- شبکه‌بندی دامنه حل

مدل استفاده شده، دوبعدی است؛ بنابراین در ابتدا شبکه ایجاد شده توسط نرم‌افزار به منظور مدل‌سازی جریان، تراز سطح آب و نظایر آن مورد بررسی قرار گرفت و سپس اندازه سلول مناسب جهت شبکه‌بندی تعیین گردید.

پس از تعیین شبکه کانال، برای تحلیل جریان در نرم‌افزار MIKE 21 از ماژول Flow Model (FM) برای مدل‌سازی استفاده گردید.

در جریان مقطع پر، شرایط جریان در کانال در یک نقطه معین نسبت به زمان ثابت است. در آزمایش‌های سری B که شیب بیشتری دارد، حداکثر جریان ۲۲ لیتر بر ثانیه، پهنه‌های سیلابی را در آستانه حرکت قرار می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ مقادیر دبی آمده است، در صورتی که از دبی ۶ لیتر بر ثانیه در کانال اصلی استفاده گردد با توجه به دبی بالا در مقطع پر کانال اصلی، عمق جریان بر روی پهنه‌های سیلابی کم‌تر شده که در نتیجه دبی مجاز میان ۲۲ تا ۲۵ لیتر بر ثانیه به دست آمده است. میزان دبی پایه ۲ لیتر بر ثانیه به گونه‌ای انتخاب شد که تنش برشی مرزی کانال اصلی زیر آستانه حرکت برای شرایط ورودی در مقطع باشد. در آزمایشگاه ۳ مقطع عرضی میانی در فواصل ۳ متر از یکدیگر در طول کانال اندازه‌گیری گردید که هر یک از این مقاطع به دوزنقه تبدیل شده و در نقطه وسط ابعاد مقاطع، میانگین آن‌ها که در ادامه در شکل ۷ ارائه شده است، به عنوان ابعاد پایدار مقطع ثبت گردید.

۲-۳- مدل‌سازی هندسی

مدل عددی مورداستفاده در این تحقیق، بسته نرم‌افزاری MIKE 21 است. این مدل جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم بر فرآیندها از جمله معادلات مومنوم، انتقال-انتشار و پیوستگی، از روش حجم محدود میان‌سلولی استفاده می‌کند. مدل محاسباتی اصلی کل نرم‌افزار MIKE 21، مدل هیدرودینامیکی^۱ است که بسیاری از مدل‌های دیگر بر پایه

¹ Hydrodynamic Models

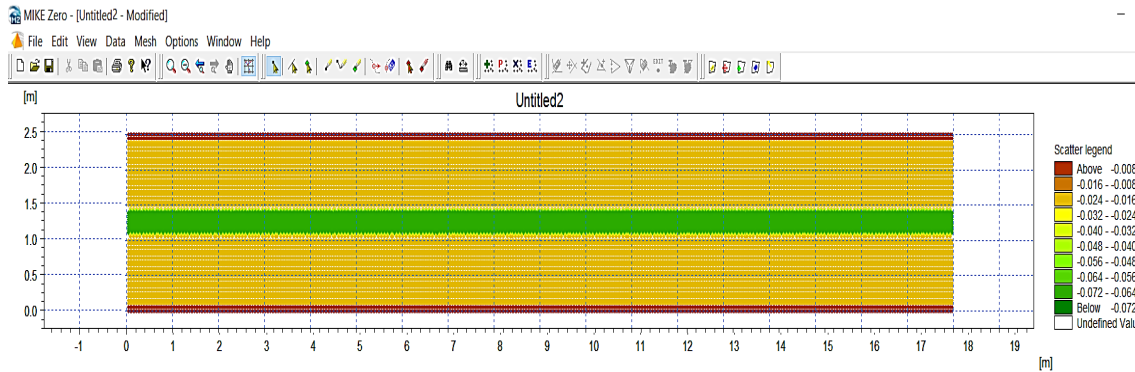


Fig. 3 Channel created in Mesh Generator
شکل ۳ کانال ایجادشده در مدول تولید مش

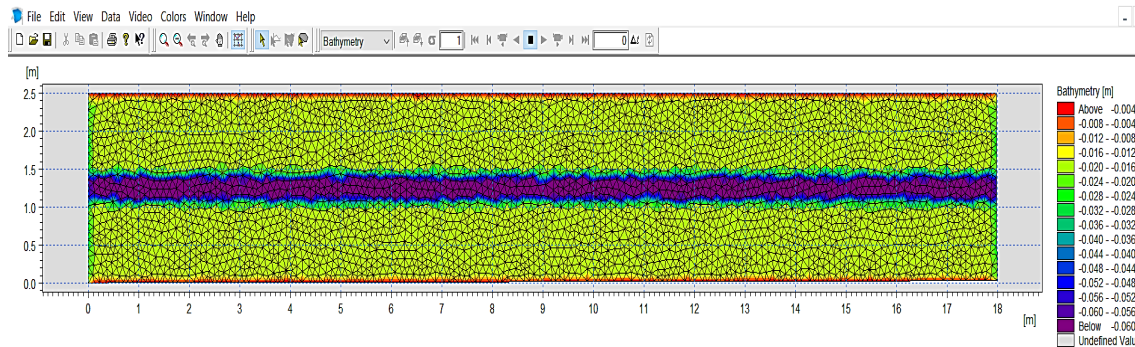


Fig. 4 The grid used in the hydrodynamics module
شکل ۴ شبکه‌بندی استفاده‌شده در مدل هیدرودینامیک

همچنین با ریزتر شدن شبکه‌بندی، دقت محاسبات و به تبع آن هزینه محاسباتی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین انتخاب شبکه محاسباتی می‌بایست با توجه به دقت و هزینه محاسباتی انجام گردد. در این تحقیق از شبکه‌بندی نامنظم مثلثی به منظور گسسته‌سازی محیط‌های آبی مدنظر استفاده گردید که بر پایه معادلات دوبعدی متوسط‌گیری- شده در عمق است. در شکل ۴ شبکه‌بندی استفاده‌شده در مدل هیدرودینامیک را نشان می‌دهد.

از آنجایی که در این تحقیق به دلیل ورود سیل به سیلاب-دشت کانال، می‌بایست تعداد زیادی گره در شبکه محاسباتی جهت ارائه نتایج دقیق‌تر در نظر گرفت، برای این منظور در تمامی قسمت‌های کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها تعداد نقاط بیشتری انتخاب شد تا بتوان رفتار جریان را بهتر بررسی نمود. شکل ۵ تعداد نقاط و شبکه انتخابی در راستای طولی و عرضی را نمایش می‌دهد.

در مدل‌سازی هیدرودینامیکی از روابط پیوستگی و همچنین اندازه حرکت در عمق، جهت محاسبه تراز سطح آب و الگوی جریان، انتگرال‌گیری می‌شود. برای افزایش دقت محاسبات در محدوده پژوهش و صرفه‌جویی در زمان لازم برای شبیه‌سازی عددی و استفاده هدف‌دار از اطلاعات عمق کف، از قابلیت طراحی شبکه‌بندی انعطاف‌پذیر در مدل ریاضی بهره‌گیری شده است. ابعاد شبکه‌ها در سراسر محدوده مورد مطالعه به صورت یکنواخت انتخاب شده است. بر این اساس شبکه‌بندی مدل با ۱۲۰۶۷۸ المان و ۶۱۶۴۲ گره محاسباتی انجام گردیده است. زمانی که اختلاف مقادیر یکی از پارامترهای محاسباتی کمتر از ۵٪ گردد، افزایش تعداد المان‌ها متوقف می‌شود. این مرحله با ریزتر شدن شبکه و بررسی اختلاف تراز سطح آب و با در نظر گرفتن میزان خطای نسبی در محاسبات صورت می‌گیرد. اندازه سلول شبکه در این تحقیق ۰/۰۰۰۶ متر مربع تعیین شد.

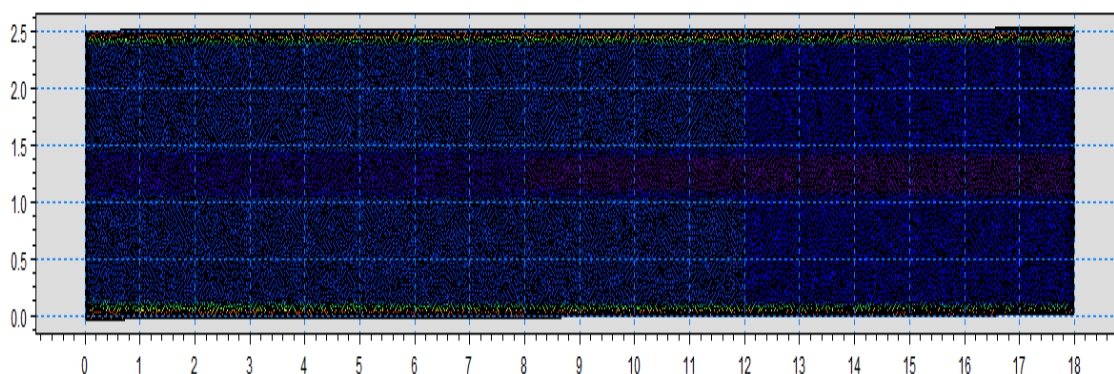


Fig. 5 The number of points and selected network in the longitudinal and transverse directions of the channel

شکل ۵ تعداد نقاط و شبکه انتخابی در راستای طولی و عرضی کانال

و x بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (3)$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (4)$$

یکی از عواملی که به منظور در نظر گرفتن اثر پدیده‌های مختلف بر اتلاف انرژی جریان و سایر عوامل مؤثر در اتلاف جزئی از انرژی سیال، به صورت یک ابزار ریاضی در معادلات وارد می‌شود، ویسکوزیته گردابی است. پارامتر ویسکوزیته گردابی را می‌توان به عنوان عامل جایگزین آن‌ها در محاسبات به کار گرفت. در نرم‌افزار، مدل ویسکوزیته گردابی افقی با سه حالت متفاوت بدون گردابی، فرمول اسمانگورینسکی و فرمول گردابی قابل اعمال است. در این تحقیق، فرمول اسمانگورینسکی انتخاب شده که می‌بایست ضریب آن مشخص گردد. اسمانگورینسکی در سال ۱۹۶۳ پیشنهادی ارائه داد که مقیاس زیر شبکه انتقالات به وسیله تاثیر ویسکوزیته گردابی بیان گردد که با مقیاس طول مشخصه رابطه دارد. مقیاس زیر شبکه ویسکوزیته گردابی به شرح زیر است (MIKE 21 User's Manual, 2014):

$$A = c_s^2 t^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

t طول مشخصه، c_s یک ثابت و S_{ij} نرخ تغییر شکل است

۲-۵- شرایط مرزی مسئله

در این تحقیق شرط مرزی بالادست، Specified Discharge با کد ۲ انتخاب شده است که به دو صورت ثابت در زمان تعریف گردیده و قالب کلی ورودی دی، مترمکعب بر ثانیه است. شرط مرزی پایین دست نیز Specified Level و تراز سطح آب بر حسب متر با کد ۳ تعریف گردید. همچنین دیواره سمت چپ و راست کانال با کد ۰ یا Land Boundary تعریف گردیده است.

۲-۶- روش حل

در نرم‌افزارهای مختلف به منظور شبیه‌سازی رودخانه‌ها از معادلات آب‌های کم عمق استفاده می‌گردد که در آن تغییرات فشار با عمق به صورت خطی بوده و فشار هیدرواستاتیک $P = \gamma h$ تعریف می‌شود. γ وزن مخصوص و h عمق آب است. با انتگرال گیری از معادلات اندازه حرکت دوبعدی و معادله پیوستگی، معادلات دوبعدی آب کم عمق به دست می‌آید (MIKE 21 User's Manual, 2014).

$$h = \eta + d \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (2)$$

نماد میانگین یا بار، بیانگر مقدار میانگین عمقی است. به عنوان نمونه \bar{v} و \bar{u} سرعت‌های میانگین عمقی در راستای y

$$CFL = C \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (8)$$

براساس کانال آزمایشگاهی و شبکه ایجادشده در این تحقیق، مدت زمان ۳۰ ثانیه، مقدار مناسبی برای گام زمانی بود. زمان اجرای نرم افزار در مقایسه با زمان انجام آزمایش ها در آزمایشگاه، بیشتر در نظر گرفته شده و زمان گرم شدن مدل، حدفاصل ۱۰۰ تا ۱۸۰ ثانیه است.

در انتها به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از مدل MIKE 21 با داده های آزمایشگاهی، از چهار روش آماری شامل: ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربع خطا ($RMSE^1$)، اختلاف نسبی (DR) و میانگین قدر مطلق خطاهای نسبی (MAE^2) استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی و صحت سنجی

به منظور واسنجی مدل، نتایج مدل با اطلاعات مشاهداتی معین در یک بازه زمانی استخراج شد. همین طور به منظور رسیدن به یک سازگاری بهینه میان محاسبات مدل نسبت به داده های اندازه گیری شده، پارامترهای مدل نظیر ضریب اصطکاک کف و جریان هیدرودینامیکی انتخاب و شبیه سازی انجام شد. لازم به ذکر است که به منظور مدل سازی انتقال رسوب، اجرای مدول هیدرودینامیکی به منظور محاسبه شرایط جریان و کانال مورد بررسی، الزامی است. ظرفیت انتقال رسوب در هر گره از شبکه کانال تعریف شده با استفاده از اطلاعات غلظت رسوب، اندازه و دانه بندی ذرات رسوبی، عمق آب و مشخصات جریان، به عنوان داده های ورودی، تعیین گردید.

اندازه دانه بندی در این نرم افزار D_{50} می باشد که نماینده اندازه دانه برای شبکه مشخص در شبیه سازی مدل در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه معادلات موجود معمولاً براساس شرایط آزمایشگاهی یا ویژگی های رسوب بستر خاصی به دست آمده اند، لذا به منظور استفاده از آن ها در

که به صورت زیر محاسبه می شود (MIKE 21 User's Manual, 2014):

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), (i, j = 1, 2) \quad (6)$$

ضریب اسماگورینسکی c_s می بایست در محدوده ۰/۲۵ تا ۱ باشد. باید توجه داشت که استفاده از رابطه آشفتگی اسماگورینسکی، منجر به افزایش زمان مورد نظر برای پردازش داده ها خواهد شد. در این تحقیق ضریب اسماگورینسکی به منظور پایداری مدل، ۰/۲۸ در نظر گرفته شده است.

زبری بستر و یا مقاومت، توسط ضریب شزی و یا عکس ضریب مانینگ به مدل معرفی می شود. این ضریب نشان دهنده اثر اصطکاک کف بر الگوی جریان در مدل می باشد. بین عکس ضریب مانینگ و ضریب شزی رابطه زیر برقرار است:

$$C = Mh\bar{\epsilon}^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

h عمق آب و M عکس ضریب مانینگ است. با توجه به مقدار به دست آمده در آزمایشگاه، ضریب مانینگ ۰/۱۵ است که در ادامه مقدار عکس آن یعنی ۶۶ به مدل معرفی گردید.

پایداری و همگرایی مدل های عددی به مشخصات پارامترهای خاصی نظیر گام های مکانی و زمانی مدل وابسته است. در مدول هیدرودینامیک به منظور تعیین شرایط پایداری، عدد کورانت تعیین گردیده است. جهت دستیابی به پایداری کامل، عدد کورانت حداکثر می تواند برابر ۱ باشد. در راستای شبیه سازی، کاربر می بایست مدت زمان اجرای گام زمانی را مشخص نماید به نحوی که با پدیده پرش هیدرولیکی و ناپایداری مواجه نشود. فرمول عدد کورانت به صورت زیر است (Abui Mehrizi, 2014):

² Mean Absolute Error

¹ Root Mean Square Error

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} \quad (12)$$

در این مرحله برای نتایج رسوب با در نظر گرفتن معادله انتقال رسوب انتخاب شده، نرم افزار به منظور تعیین پارامترهای مؤثر بر شبیه سازی رسوب، کالیبره شد. از میان پارامترهایی که در نرم افزار MIKE 21 جهت شبیه سازی انتخاب می شود، می توان به نوع معادله انتقال رسوب، تعداد محاسبات در هر گام زمانی، زبری بستر، زاویه پایداری مصالح بستر و مدل آشفتگی اشاره نمود که تغییرات نتایج حاصل از آن ها و حساسیت فرآیند، نسبت به تغییر این پارامترها بررسی می شود. در این مرحله با استفاده از ۳ سری آزمایش برای واسنجی نرم افزار، نتایج جدول ۲ حاصل شد.

در این تحقیق، از زاویه پایداری استخراج شده در نتایج آزمایشگاه ۳۳° استفاده گردید. دمای آب از جمله پارامترهای اثرگذار در روابط انتقال رسوب است که بر مقدار لزجت دینامیکی آب اثرگذار است. بنابراین دمای در نظر گرفته شده در آزمایشگاه به عنوان دمای آب قرار داده شد. در این مرحله سعی شده است تا مدل ابعاد مقطع عرضی را با دقت هر چه بیشتر در مقایسه با ابعاد کانال آزمایشگاهی، برآورد گردد. نتایج حاصل از واسنجی جریان مقطع پر در جدول ۳ آمده است که با توجه به آن، مدل توانسته است عرض بالا (B) و عرض پایین (b) را به خوبی برآورد نماید.

صحت سنجی، آخرین مرحله ای است که باید بعد از مرحله واسنجی انجام شود. برای این منظور از اطلاعاتی که در مرحله واسنجی استفاده نشده است، بهره گیری می شود؛ بنابراین مدل صحت سنجی شده با اطلاعات جدید اجرا شده و نتایج محاسبات به دست آمده توسط نرم افزار با اطلاعات اندازه گیری شده مقایسه می شود. در صورت تطابق نتایج با یکدیگر، صحت سنجی مدل قابل اطمینان است و می توان از پیش بینی مدل برای تغییرات آینده استفاده کرد. در غیر این صورت، جهت بررسی میزان تاثیر خطای ناشی از اطلاعات ورودی بر نتایج خروجی مدل، آنالیز حساسیت

شرایط دیگر باید واسنجی شده و معادله بهینه تعیین گردد. در این تحقیق انتخاب معادله بهینه انتقال رسوب و واسنجی مدل با استفاده از مشخصات هندسی کانال ها انجام گردید. به عبارت دیگر هر روشی که ابعاد هندسی مقطع عرضی و شیب کانال را نسبت به سایر روش ها بهتر پیش بینی کند انتخاب می گردد. در ماژول FLOW MODEL (FM) در نرم افزار MIKE 21 معادلات انتقال رسوب، محدود است.

محاسبات انتقال رسوب براساس سرعت سقوط ذرات، با توجه به معادله انتقال رسوب و دانه بندی مصالح بستر محاسبه گردید. پس از مدل سازی هندسه کانال، اختصاص ضریب زبری، وارد کردن دبی و تعیین شرایط مرزی جریان، لازم است معادله انتقال رسوب مورد استفاده مشخص گردد. جهت مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی از معیار ضریب همبستگی استفاده می شود. با توجه به سه معادله انتقال رسوب انگلند-هانسن، ون-راین و میر-پیترمولر در مدل MIKE 21، رابطه انتقال رسوب انگلند-هانسن با مقدار متوسط گیری ضریب همبستگی ۰/۹۵ به عنوان رابطه مناسب برای پارامترهای ابعاد کانال انتخاب گردید. معادله انگلند-هانسن، یک معادله از نوع بارکل بوده که مبین وابستگی انتقال رسوب به تنش برشی و فاکتور اصطکاک بستر f' است که در آن g شتاب ثقل، V سرعت متوسط جریان، q_s دبی کل رسوب به وزن در واحد عرض، S شیب انرژی، γ_s وزن مخصوص رسوب، γ وزن مخصوص آب، θ عدد شیلدز و τ تنش برشی در امتداد بستر است (van Rijn., 1984).

$$f' \varphi = 0.1\theta^{5/2} \quad (9)$$

$$f' = \frac{2gSD}{V^2} \quad (10)$$

$$\varphi = q_t \left[\gamma_s \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g d^3 \right]^{-1/2} \quad (11)$$

گردیده که با توجه به نتایج آن‌ها (جدول ۵) می‌توان نتیجه گرفت که مدل، توانسته است مقادیر عرض پایین (b)، عرض بالا (B)، شیب جانبی (z) و عمق (h) را به خوبی پیش‌بینی نماید.

۳-۱- نتایج مدل در جریان سیلابی (بالتر از تراز لبریز)

در این مدل‌سازی دبی ۱۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه، در آزمایش‌های سری A باعث بی‌نظمی همراه با تغییرات در عرض بالایی کانال شده که به دلیل سرعت بالای جریان در سطح آب، اتفاق افتاده است. در نهایت، جریان با عریض کردن کانال، کناره‌ها را منظم نمود. وجود تلاطم جریان در مقاطع اول و آخر کانال منجر به تغییرات بیشتری می‌شود. همچنین تلماسه‌های دوبعدی نیز مشاهده شده است. هنگامی که شرایط کانال از شرایط جریانی مقطع پر به

مدل انجام می‌شود؛ بنابراین مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده می‌بایست با نتایج مدل در طول دوره شبیه‌سازی صحت‌سنجی، مقایسه شود. در صورت رسیدن به یک مقدار قابل قبول از سازگاری میان نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار و داده‌های اندازه‌گیری شده، صحت مدل را می‌توان برای شرایط مجموعه داده‌های مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مورد تأیید قرارداد. هنگامی که حداقل شرایط سازگاری قابل قبول محقق نگردد، در این صورت می‌بایست برای مشخص کردن دلایل ممکن جهت پالایش و بازبینی مدل، تفاوت‌های موجود میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده، تجزیه و تحلیل گردد. در این مرحله از ۳ آزمایش دیگر برای صحت‌سنجی جهت تأیید واسنجی استفاده گردیده و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

به جهت بررسی دقت صحت‌سنجی مدل از چهار پارامتر آماری که در مرحله واسنجی به آنها اشاره شد، استفاده

جدول ۲ نتایج واسنجی برای جریان مقطع پر کانال پایدار

Table 2 Calibration results for stable channel bankfull flow

Series	Q (l/s)	S	B (mm)	d (mm)	b (mm)	z	T (°C)	Duration (h)
A3	4	0.0017	370	34	220	2.29	16	6.05
B1	2	0.002	420	26.5	255	2.49	16	6
B3	6	0.002	455	31.8	315	2.47	16	7.01

جدول ۳ نتایج پارامترهای آماری در مرحله واسنجی برای ارزیابی مدل با جریان مقطع پر

Table 3 Statistical parameters in the calibration phase to evaluate the model with bank full flow

Assessment	RMSE	R ²	MAE	DR
b	0.22	0.94	0.18	1.02
B	0.15	0.97	0.2	0.97
z	0.5	0.35	0.46	0.89
h	0.1	0.96	0.14	0.87

جدول ۴ نتایج پایداری کانال با جریان مقطع پر در مرحله صحت سنجی مدل

Table 4 Results of channel stability with bank full flow in model validation stage

Series	Q(l/s)	S	B(mm)	d(mm)	b(mm)	z	T(°C)	Duration(h)
A1	5	0.0017	460	38	241	2.56	16	7
A2	6	0.0017	449	39	250	2.34	16	7.40
B2	4	0.002	388	33.5	196	2.14	16	6.35

جدول ۵ پارامترهای آماری جهت ارزیابی مدل با جریان مقطع پر در مرحله صحت سنجی

Table 5 Statistical parameters to evaluate the model with the bank full flow in the verification stage

Assessment	RMSE	R ²	MAE	DR
b	15.47	0.945	8.7	0.98
B	6.22	0.988	4.05	0.975
z	14.65	0.763	10.04	1.083
h	9.32	0.736	7.55	0.95

در زمان سیلاب، عرض کانال اصلی به سرعت افزایش می‌یابد (Ershadi & Valentine, 2005). این مشاهدات با مطالعات (Gupta & Fox (1974) ، Pitlick et al (2004) مطابقت دارد. بنابراین هندسه کانال متفاوتی ایجاد می‌شود (Ershadi & Valentine, 2005).

در شکل ۸ پروفیل عرضی سرعت جریان ارائه شده است که تغییرات سرعت عرضی در ارتفاع مقطع را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن لایه مرزی، سرعت حداقل، در مجاورت کف و دیواره و به میزان تقریبی $0/0017$ متر بر ثانیه برای سرعت عرضی اتفاق می‌افتد. مقدار حداکثر سرعت نیز در نزدیکی سطح جریان و در وسط مقطع عرضی و به مقدار حدودی $0/012$ متر بر ثانیه برای سرعت عرضی رخ می‌دهد. ضخامت سلول‌های شبکه عرضی با نزدیک شدن به مرزهای فرسایش‌پذیر جهت بررسی دقیق‌تر، کمتر در نظر گرفته شده است.

جریان سیلابی تغییر کرد، غلظت رسوب نیز کاهش یافت. در آزمایش‌های سری B نیز تغییرات در ارتفاع کانال مشاهده گردید و از طریق ماریج و کم‌عمق نمودن آن، به شرایط پایدار رسیده است. در شکل ۶ تغییرات عمق آب در طول کانال پس از شبیه‌سازی عددی برای جریان سیلابی نشان داده شده است.

شکل ۷ نیز تغییرات متوسط مقطع در فواصل ۶، ۱۱ و ۱۳ متری برای کانال توسعه‌یافته از ابتدای کانال را نشان می‌دهد. در جریان سیلابی، مقطع نهایی مدل به مقطع مشاهده‌ای نزدیک است. تغییرات غلظت رسوب و مقطع در مدل آزمایشگاهی در مدت زمان حدود ۶ ساعت پس از عبور جریان آب ناچیز بود و به شرایط پایدار رسید؛ در حالی که در مدل ریاضی بعد از گذشت ۳ ساعت، نرخ عریض شدن کانال کاهش یافته و سرانجام به پایداری می‌رسد. این نکته نشان‌دهنده نرخ تغییرات بیشتر در شبیه‌سازی نرم‌افزار است.

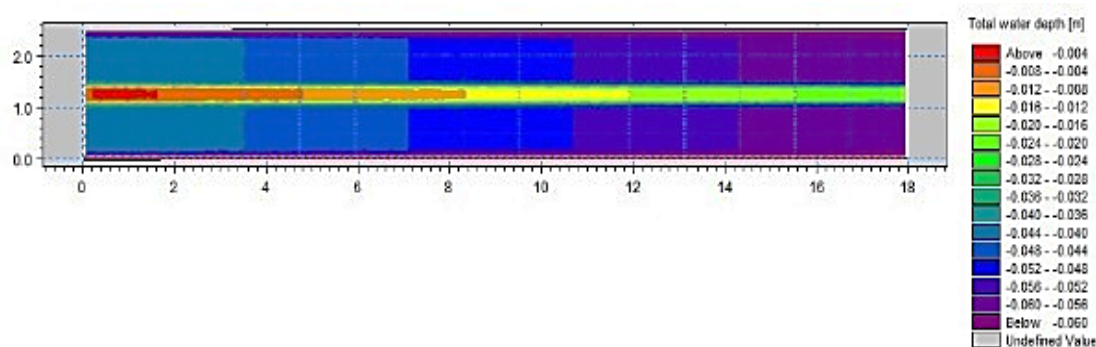


Fig. 6 Water depth changes along the stable channel in the A2 test series
شکل ۶ تغییرات عمق آب در طول کانال پایدار در سری آزمایش A2

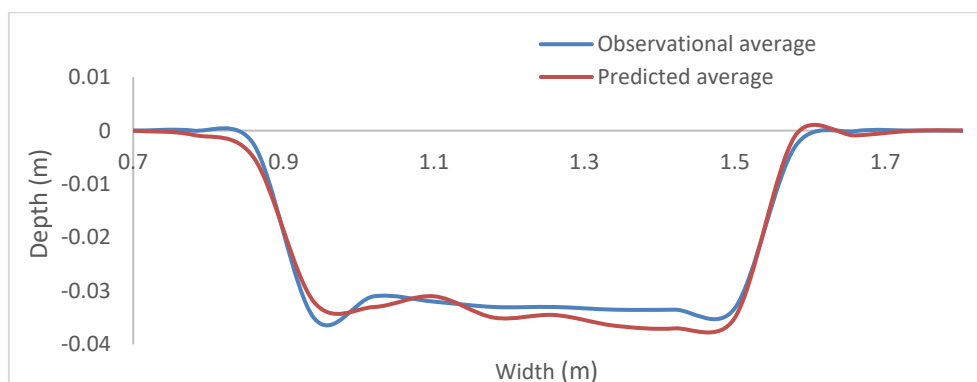


Fig. 7 The average sections of 6, 11, and 13 meters from the beginning of the developed laboratory channel A2
شکل ۷ متوسط مقاطع ۶، ۱۱ و ۱۳ متری از ابتدای کانال توسعه‌یافته آزمایشگاهی A2

در مجاری فرسایش‌پذیر باعث رسیدن کانال به حالت پایدار دینامیکی خود می‌گردد. Leopold (1964) نیز به خودتنظیمی پیوسته رودخانه‌ها تا رسیدن به شرایط پایدار اشاره می‌نماید (Ershadi & Valentine., 2005).

در شکل ۱۲ تغییرات عرض بالای کانال نسبت به زمان در مدل و نتایج آزمایشگاهی A2 ارائه شده است.

در کانال آزمایشگاهی، نخست تغییرات عرض کانال شدیدتر بوده و بعد از ۶ ساعت، تغییرات ناچیز شده و کانال به شرایط پایداری دست‌یافته است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، تغییرات عرض توسط مدل در ۱۵۰ دقیقه اول شبیه‌سازی رخ داده است و سپس تغییرات عرض بالایی کانال تقریباً ثابت می‌گردد که به دلیل استفاده از معادله انتقال رسوب انگلند-هانسن است. در واقع در بازه زمانی ۱۵۰ دقیقه نخست تقریباً ۹۰٪ تغییرات انجام شده و متوسط عرض بالای کانال براساس شکل ۱۲ در ۷۱۰ میلی‌متر ثابت می‌گردد.

در شکل ۹ نیز توزیع سرعت طولی در محور طولی کانال در مدل در فاصله ۱۱ متر از ابتدای کانال ارائه شده است. مقدار سرعت از کف تا سطح جریان، حداقل ۰/۱۵ متر بر ثانیه بوده و حداکثر تا میزان ۰/۱۳ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ پروفیل عرضی سرعت جریان، ارائه شده است که تغییرات سرعت طولی در ارتفاع مقطع را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن لایه مرزی، سرعت حداقل در مجاورت کف و دیواره و به مقدار تقریبی ۰/۱ متر بر ثانیه برای سرعت طولی اتفاق می‌افتد. مقدار حداکثر سرعت نیز در نزدیکی سطح جریان و در وسط مقطع عرضی و به مقدار حدود ۰/۳ متر بر ثانیه برای سرعت طولی رخ می‌دهد.

شکل ۱۱، تغییرات عمق کانال را در طول مدت ۵۸۰ دقیقه‌ای اجرای مدل MIKE 21، نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که عمق کانال در مدت ۲/۲ ساعت اول شدیدتر بوده و پس‌از آن تغییرات تقریباً متوقف شده است. مجموعه تغییرات عمق، عرض و غلظت رسوبات

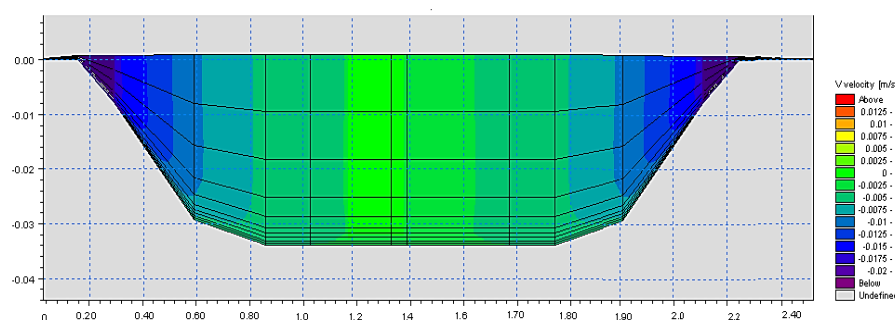


Fig. 8 Transverse velocity distribution in the cross-section of channel A2 in the model
شکل ۸ توزیع سرعت عرضی در مقطع کانال A2 در مدل

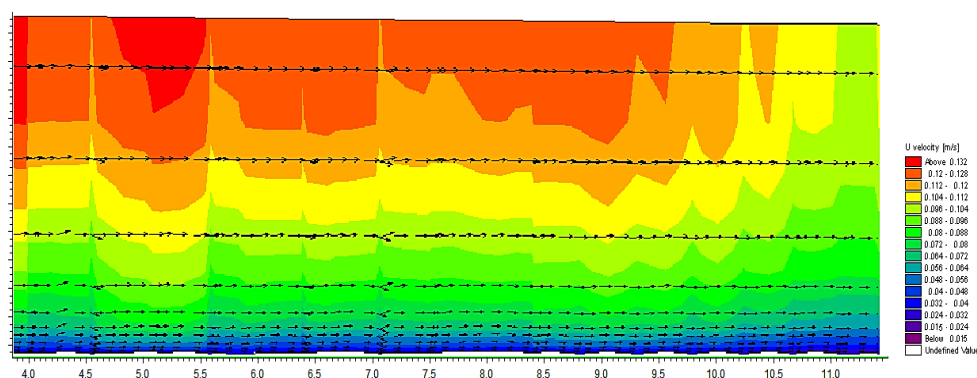


Fig. 9 Longitudinal velocity distribution in the longitudinal axis of the model at a distance of 11 meters of channel A2
شکل ۹ توزیع سرعت طولی در محور طولی در فاصله ۱۱ متری از کانال A2

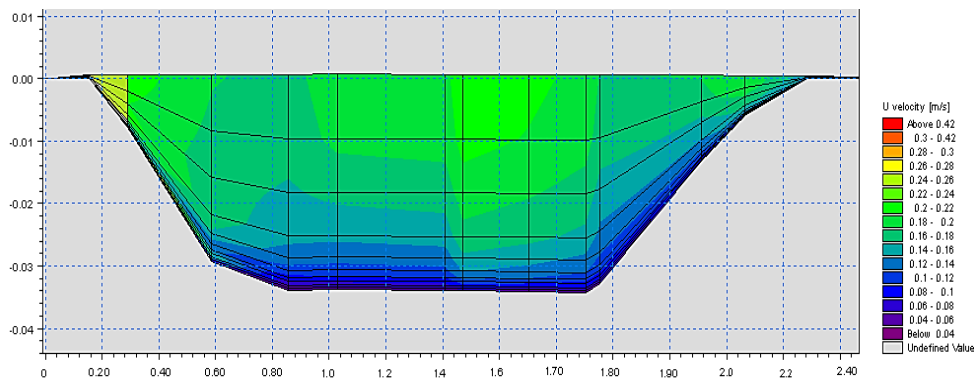


Fig. 10 Longitudinal velocity distribution in the cross-section of channel A2 in the model
 شکل ۱۰ توزیع سرعت طولی در مقطع کانال A2 در مدل

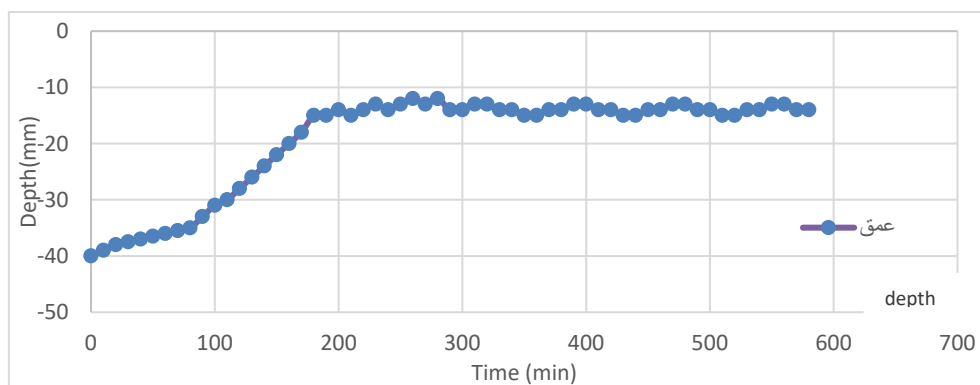


Fig. 11 Channel depth changes during the passage of current in channel A2
 شکل ۱۱ تغییرات عمق کانال در زمان عبور جریان در کانال A2

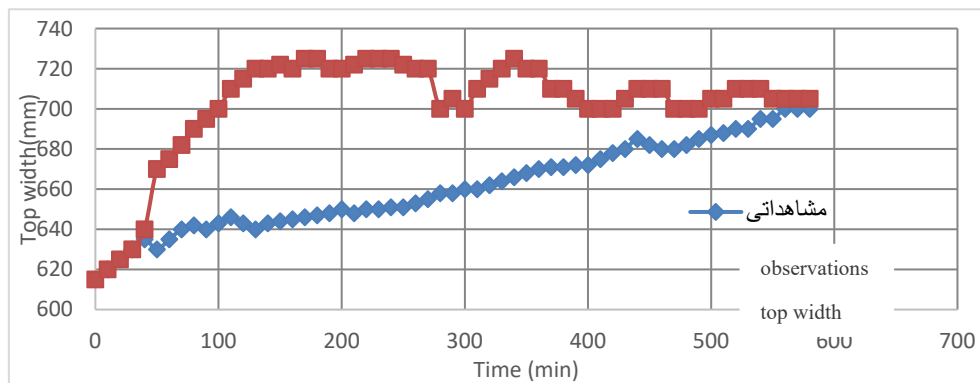


Fig. 12 Changes in the top width of the channel during the passage of current in channel A2
 شکل ۱۲ تغییرات عرض بالایی کانال در مدت عبور جریان در کانال A2

تعیین رژیم جریان ون راین و برونلی در حالت جریان مقطع پر و بالاتر از تراز لبریز با یکدیگر مقایسه می‌گردد تا از صحت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود. مقادیر برآورده شده توسط هر کدام از روش‌های تعیین رژیم جریان در مقایسه با مقادیر مشاهداتی رسم گردیده و اختلاف نسبی

۲-۳- روش‌های تعیین رژیم جریان و مقایسه نتایج آزمایشگاه با مدل MIKE 21

نتایج حاصل از مدل عددی MIKE 21 بعد از مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل با مقادیر مشاهداتی و روش طراحی کانال پایدار نظیر روش WBP، همچنین روش

عرض پایین آن در برابر زاویه پایداری بستر با شدت بیشتری همراه است.

شکل ۱۴ روند تغییرات عمق کانال را در برابر تغییرات زاویه پایداری مصالح بستر v_h تا زاویه ۳۰ نمایش می‌دهد.

بررسی واسنجی مدل نسبت به میزان دبی جریان

افزایش دبی باعث شسته شدن بیشتر کناره‌های کانال و انتقال رسوبات آن به کف کانال شده و به تبع آن کاهش عمق و عریض شدن کانال را در پی دارد. این تغییرات تا رسیدن کانال به شرایط پایدار، به صورت هم‌زمان انجام می‌شوند. همان‌طور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده است، با افزایش دبی تا حدود ۱۵ لیتر بر ثانیه، عمق و عرض با شدت بیشتری تغییر یافته و سپس این تغییرات تقریباً ثابت می‌گردد.

بررسی واسنجی مدل به میزان مقاومت بستر

همان‌طور که در قبل به آن اشاره گردید، جهت معرفی مقاومت بستر در مدول هیدرودینامیک جریان به مدل عددی MIKE 21، می‌توان از یکی از دو پارامتر ضریب مانینگ یا ضریب سزی استفاده نمود. البته اگر تغییرات نسبی سطح آب زیاد باشد، می‌بایست از ضریب مانینگ بهره گرفت با این شرط که جهت به‌کارگیری ضریب مانینگ در این نرم‌افزار باید مقدار عکس آن را قرار داد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی از عدد مانینگ ۶۶ استفاده شده است. مطابق شکل ۱۷، با بررسی مقادیر مختلف عدد مانینگ نظیر

میان مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عرض پایین و بالا مقطع دوزنقه‌ای، غلظت رسوب و عمق، در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل MIKE 21 ابعاد مقطع پایدار نظیر عرض، عمق و غلظت رسوب را در مقایسه با سایر روش‌ها به‌خوبی برآورد می‌نماید.

۳-۳- واسنجی مدل نسبت به پارامترهای اثرگذار

از آنجایی که پارامترهای مختلفی در روابط انتقال رسوب تاثیر گذار هستند، ضروری است پس از تعیین بهترین معادله انتقال رسوب، واسنجی مدل نسبت به این پارامترها موردسنجش قرار گیرد. در این بخش به بررسی واسنجی مدل، نسبت به فاکتورهای اساسی حاکم در مسئله پرداخته می‌شود.

بررسی واسنجی مدل نسبت به زاویه پایداری مصالح بستر

در این بررسی با فرض ثابت بودن همه پارامترها، زاویه پایداری مصالح از ۲۰ تا حدود ۷۰ درجه تغییر داده شده است.

فرآیند تغییرات ابعاد مقطع کانال نظیر عرض پایین و عرض بالا در برابر افزایش زاویه پایداری مصالح بستر در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. با افزایش زاویه ϕ تا حدود ۳۵ درجه، عرض پایین کانال رو به افزایش بوده و پس از آن هرچقدر زاویه پایداری بستر افزایش یابد، بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین با افزایش زاویه ϕ تا حدود ۴۰ درجه، عرض بالای کانال نیز افزایش یافته و سپس روندی تقریباً ثابت را طی می‌کند؛ بنابراین، تغییرات عرض بالای کانال نسبت به

جدول ۶ اختلاف نسبی به‌دست‌آمده توسط MIKE 21، ون‌راین، WBP و برونلی به ازای پارامترهای هیدرولیکی پیش‌بینی شده

Table 6 The relative difference obtained by MIKE 21, Van Rijn, WBP, and Brownlie for the predicted hydraulic parameters

Design method	Bottom width	Top width	Sediment concentration	Depth
MIKE 21	0,88	0,96	0,23	0,98
Van Rijn	0,93	0,53	0,28	1,84
WBP	0,94	0,65	0,17	1,52
Brownlie	0,93	0,46	0,31	1,66

در پاسخ به عبور سیلاب، عمق کانال کاهش و شیب دیواره-ها (شیب جانبی) افزایش یافت.

در حالت جریان سیلابی، عرض، عمق و غلظت رسوب پیش‌بینی‌شده کانال توسط نرم‌افزار MIKE 21 نسبت به برونلی، ون‌راین و WBP به‌دلیل استفاده از معادله انتقال رسوب انگلند-هانسن با سرعت بیشتری تعیین گردید. به‌طوری‌که برای آزمایش سری A2 بعد از گذشت ۱۵۰ دقیقه از عبور جریان به شرایط پایدار خود رسیده و نزدیک به ۹۰٪ تغییرات عمق و عرض در این زمان اتفاق افتاده است. عرض بالای کانال در شکل ۱۸ که توسط روش‌های ارائه‌شده برآورد گردیده کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است. هرچقدر مقادیر اختلاف نسبی به یک نزدیک‌تر باشند بیانگر

۲۵، ۳۰، ۳۲ و ۴۰ در نهایت به انتخاب عدد مانینگ برابر با ۳۲ جهت حفظ پایداری مدل، گشت.

۴- نتیجه‌گیری

هنگامی‌که کانال به‌صورت مقطع پر است، تغییر قابل‌توجهی در عرض کانال اصلی توسعه‌یافته (رژیم) ایجاد نمی‌شود، اما عرض کانال اصلی در جریان‌های سیلابی با افزایش عمق و دبی جریان به‌سرعت افزایش می‌یابد. در تمامی مدل‌ها، عرض کانال تقریباً طی ۳ ساعت ابتدایی به‌سرعت افزایش می‌یابد و پس‌از آن به مرحله تعادل نزدیک شده و از سرعت فرسایش کانال کاسته می‌شود. با افزایش دبی تا حدود ۱۵ لیتر بر ثانیه عمق و عرض کانال با شدت بیشتری تغییر یافته و سپس این تغییرات تقریباً ثابت می‌گردد. همچنین

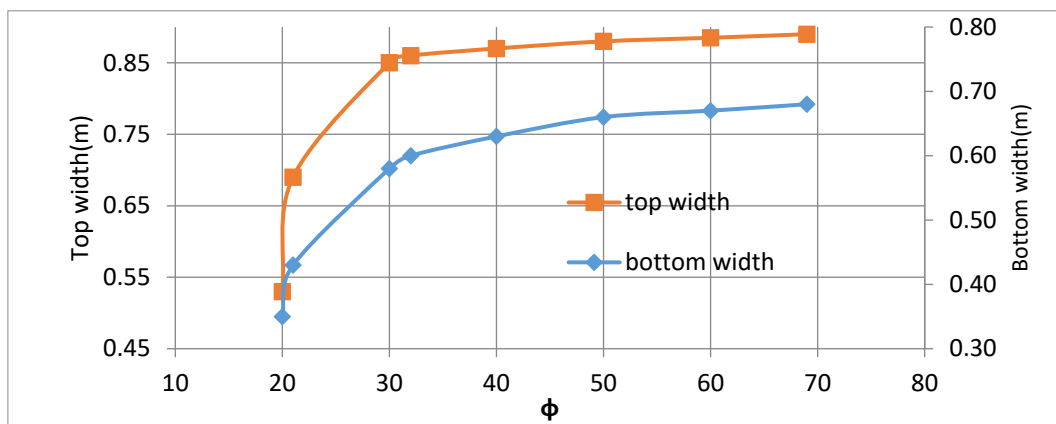


Fig. 13 Calibration of the model according to the changes in the angle of repose of the bed materials
شکل ۱۳ واسنجی مدل نسبت به تغییرات زاویه سکون مصالح بستر

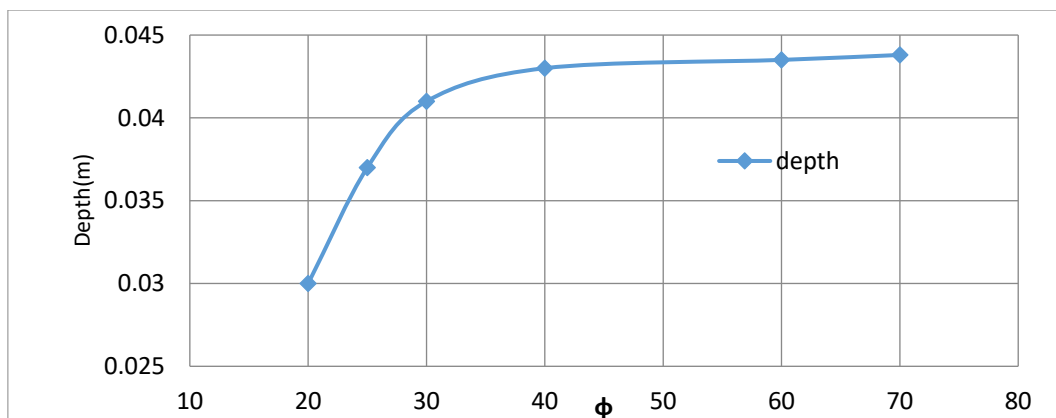


Fig. 14 Calibration of the depth of the model according to the changes in the angle of repose of the bed materials
شکل ۱۴ واسنجی عمق مدل نسبت به تغییرات زاویه سکون مصالح بستر

می‌دهد عرض بالای کانال پیش‌بینی شده است درحالی‌که اختلاف نسبی برای روش برونلی و WBP به ترتیب مقادیر متوسط ۰/۴۶ و ۰/۶۵ را نمایش می‌دهد.

دقت بالای نتایج است. به‌طور مثال در جدول ۶ متوسط مقادیر اختلاف نسبی عرض بالا در مدل MIKE 21 در مقایسه با مقادیر مشاهداتی حدود ۰/۹۶ است که نشان

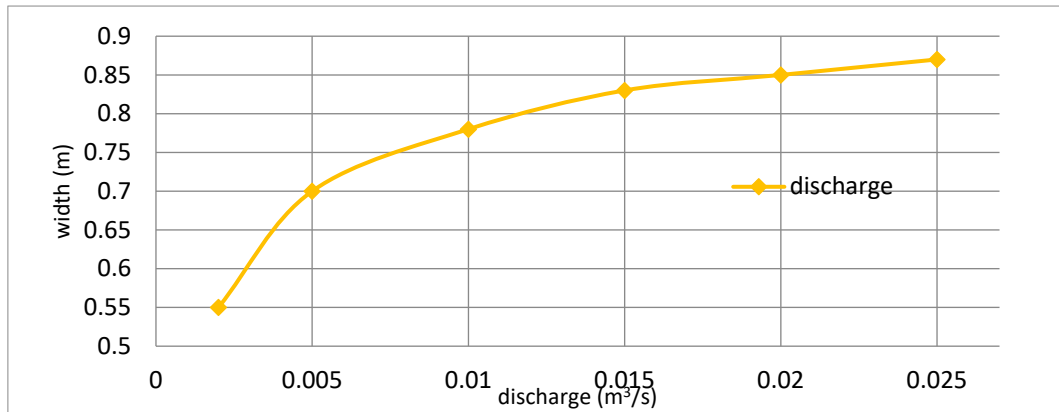


Fig. 15 Calibration of the model in width relative to the changes in the flow rate of the inlet flow
شکل ۱۵ واسنجی مدل در عرض نسبت به تغییرات دبی جریان ورودی

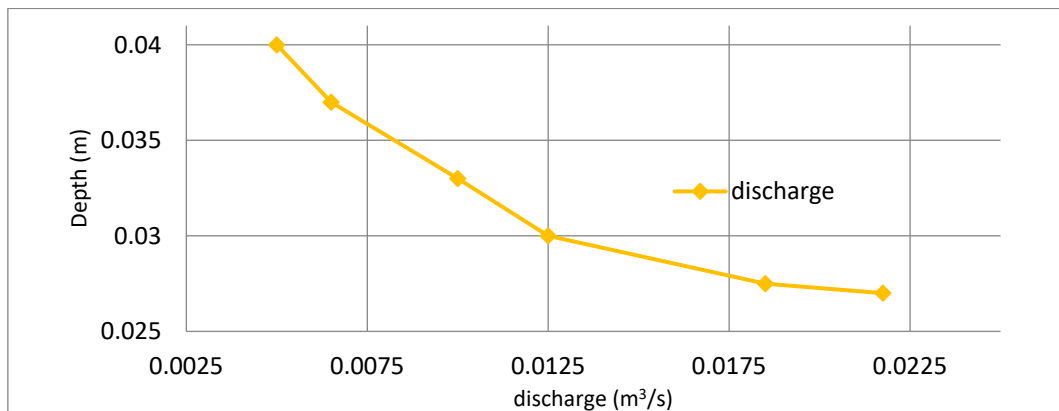


Fig. 16 Calibration of the model in depth relative to the changes in the flow rate of the inlet flow
شکل ۱۶ واسنجی مدل در عمق نسبت به تغییرات دبی جریان ورودی

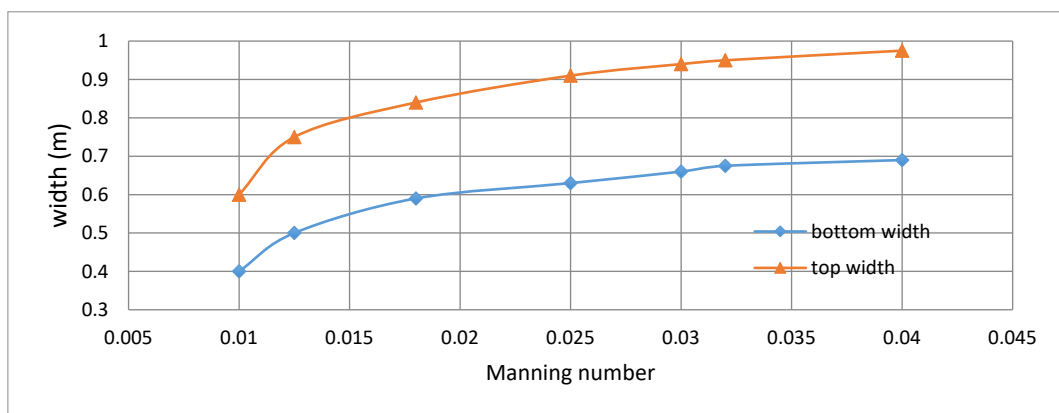


Fig. 17 Calibration of the model according to changes in bed resistance
شکل ۱۷ مدل نسبت به تغییرات مقاومت بستر

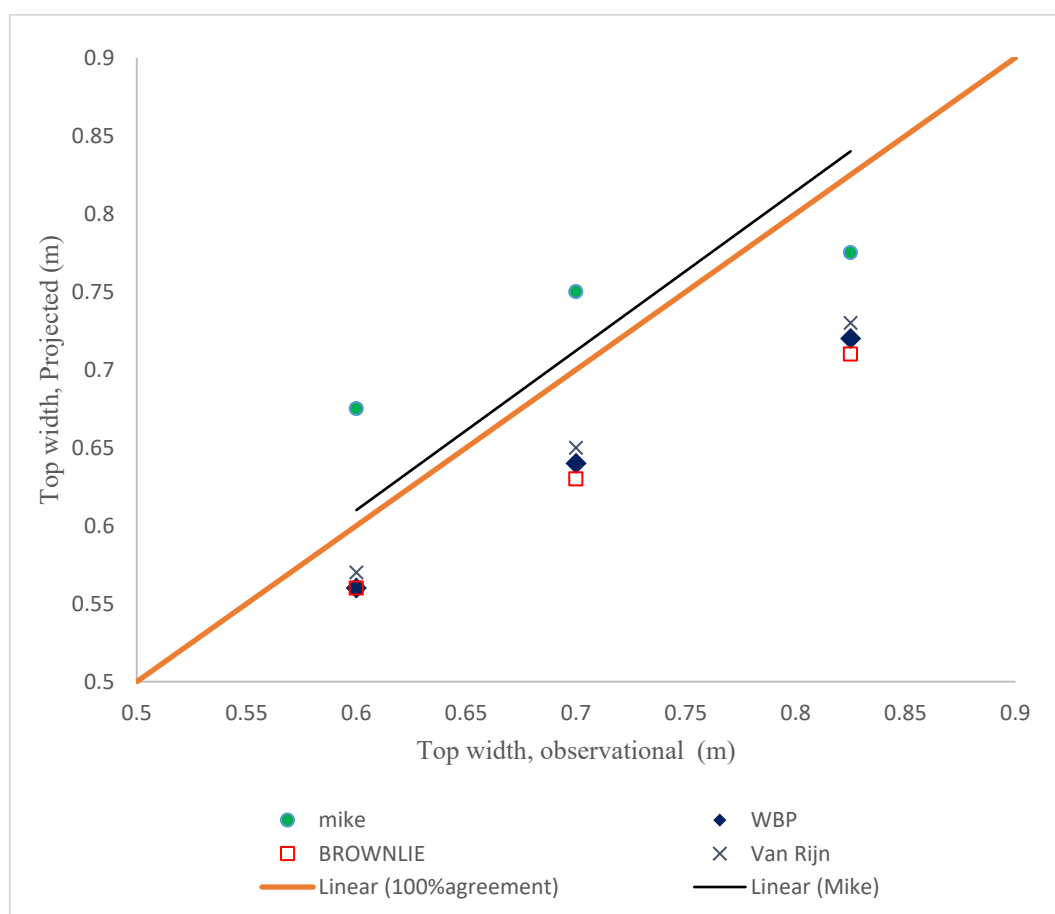


Fig. 18 The comparison model of the above channels obtained from the numerical model with the ability of observations and stable channel design methods

شکل ۱۸ مدل مقایسه مقادیر عرض بالای کانال حاصل از مدل عددی با مقادیر مشاهداتی و روش‌های طراحی کانال پایدار

C	ضریب شزی ($m^{1/2}/s$)
c_s	ضریب اسماگورینسکی (-)
D_{50}	فطر متوسط دانه (mm)
d	عمق آب ساکن (m)
h	عمق آب کل (m)
M	عدد مانینگ ($m^{1/3}/s$)
n	ضریب مانینگ ($s/m^{1/3}$)
p	فشار هیدرواستاتیک (N/m^2)
S_{ij}	نرخ تغییر شکل (-)
Δt	گام زمانی (s)
Δx	وضوح مکانی (m)
γ	وزن مخصوص (N/m^3)
η	ارتفاع سطح آب (m)
ι	طول مشخصه (m)

بنابراین یک کانال آبرفتی مقطع پر پایدار، هنگامی که در معرض شرایط جریان سیلابی و جریان لبریز قرار می‌گیرد، به سمت یک کانال پایدار جدید متمایل می‌گردد که برای تعیین اهمیت زمان پاسخ مورفولوژیکی به کار بیشتری نیاز خواهد بود؛ بنابراین در هنگام سیلاب، رژیم کانال پایدار با مقطع پر به شرایط رژیم جدید تغییر می‌کند. استفاده از مدل آشفتگی اسماگورینسکی نیز که در مدل MIKE 21 وجود دارد نتایج دقیق‌تری را نشان می‌دهد. همچنین رابطه انتقال رسوب انگلند-هانسن در مدل، ابعاد مقطع کانال پایدار را نسبت به معادلات انتقال رسوب موجود در نرم‌افزار بهتر پیش‌بینی می‌نماید.

۵- فهرست نشانه‌ها

A مقیاس زیرشبکه ویسکوزیته گردابی (-)

References

منبع‌ها

- channels with overbank flow, PhD Thesis., University of Newcastle upon Tyne, UK, 275p.
- Mike 21 User's Manual. (2014). "Flow Model Fm". Scientific Documentation. By DHI, URL: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2014/MIKE_21.htm.
- Razzaghi, M.M. and Hajikandi, H. (2010). Survey particular bankfull and determine regime equation in rivers. *8th International River Engineering Conference Shahid Chamran University*. Ahvaz, Iran (In Persian).
- Raghebi Moghaddam, M. (2014). *Modeling of Sediment Transport and Change Shoreline and Coastal Classification From Kiashahr port to Anzali port*, M.Sc.Thesis, Khorramshahr University of Marine Science and Technology Faculty of Marine Engineering, 250p. (In Persian).
- Shaghghi Khajedeji, s. (2017). *Design of stable channels geometry using gene expression programming (GEP) and genetic algorithm (GA) optimization method with the purpose of uncertainties analysis*, M.Sc.Thesis, Faculty of Engineering Department of Civil Engineering, Razi University, 183p. (In Persian).
- Tahershamsi, A., Majdzade Tabatabai, M. R., & Shirkhani, R. (2012). An evaluation model of artificial neural network to predict stable width in gravel bed rivers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 333-342, doi: 10.1007/s13762-012-0036-8.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1733-1754., doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).
- White, W. R., Bettess, R., & Paris, E. (1982). Analytical approach to river regime. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(10), 1179-1193, doi: 10.1061/JYCEAJ.0005914
- Yang, K., Cao, S., and Knight, D. W. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 148-159, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(148)
- Abui Mehrizi, A. (2014). *Modeling of Sediment Transport and Change of Shoreline and Classification of Noshahr to Ramsar*, M.Sc.Thesis, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, 181p. (In Persian).
- Arab, A. and Esmaili, K. (2021). Effect of Longitudinal and Side Slope of Flood Plain on Sediment Erosion in Compound Channel. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 25(1), 243-259 (In Persian), doi: 10.47176/jwss.25.1.42861.
- Azizyan, G. (2010). *A laboratory study of scour at river structures subject to unsteady flows*, PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK, 281p.
- Chang, H. H. (1985). Design of stable alluvial canals in a system. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 111(1), 36-43, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:1(36).
- Dhokal, D., Sharma, N., & Pandey, A. (2021). Review of Flow Simulation Methods in Alluvial River. *Hydrological Extremes: River Hydraulics and Irrigation Water Management*, 289-306, doi: 10.1007/978-3-030-59148-9_21.
- Ershadi, C., & Valentine, E. M. (2005). An experimental investigation of the channel adjustment process due to the passage of floods. *In River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Illinois, USA.
- Farias, H. D., Pilan, M. T., Mattar, M. T., & Pece, F. J. (1998). Regime width of alluvial channels: Conciliation of several approaches. *In Proceedings of the ICHE Conference, Cottbus, Germany*.
- Fan, B. S., Sun, W., Liu, Y. H., & Li, C. Z. (2022). Cross-sectional Variables of Alluvial Channels. *Authorea Preprints*, doi: 10.1002/essoar.10506001.1.
- Gholinejad, j. Zahiri, A.R. and Deghani, A. A. (2013). One and quasi two dimensional simulation of flood flows in rivers (Case Study: Gorganrood River at Aq-Qalla hydrometric station). *Journal of water and soil conservation*, 19(4), 103-119 (In Persian), doi: 20.1001.1.23222069.1391.19.4.6.3.
- Haidera, M. (2002), *The stability of alluvial*