

## Numerical investigation of the cross-section dimensions changes of the regime channel under steady and unsteady over-bank flows

Amirsajad Maleki<sup>1</sup>, Gholamreza Azizyan<sup>\*2</sup>, Seyed Arman Hashemi Monfared<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Iran. E-mail: [malekiamirsajad@pgs.usb.ac.ir](mailto:malekiamirsajad@pgs.usb.ac.ir)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Iran. E-mail: [g.azizyan@eng.usb.ac.ir](mailto:g.azizyan@eng.usb.ac.ir)
3. Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Iran. E-mail: [hashemi@eng.usb.ac.ir](mailto:hashemi@eng.usb.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 12.10.2022  
Revised: 05.12.2023  
Accepted: 05.21.2023

**Keywords:**  
MIKE21,  
Overbank,  
Regime section,  
Steady flow,  
Unsteady flow

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** 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. When a flood occurs, the interference of the flow in the main channel and the flood plain causes the transfer of movement and complexity in the flow pattern from the main channel to the flood plain. 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. There haven't been many numerical studies done on the flow pattern and sediment transport in alluvial channels, but there have been a lot of experimental studies. In this study, the behavior and hydraulic geometry of the trapezoidal compound channel have been investigated using MIKE21 software for type of steady and unsteady overbank flow and Finally, the results of modeling in steady flow conditions showed less difference with real values than in unsteady flow conditions.

**Materials and Methods:** In order to study the behavior of the main channel in the flood flow, the flow has been selected in such a way that the flood plain are in the state before the movement threshold. First, the compound trapezoidal channel section with fully losses boundaries/ with fully mobile boundaries was developed under bankfull flow, and then the behavior and geometry of the developed trapezoidal channel (regime channel) were evaluated under type of steady and unsteady flows. In the first step of permanent steady flow modeling, the flow conditions in the channel at a certain point are constant with respect to time, which means that the speed along the flow and the average depth of the flow are the same. In the second step of the modeling, the unsteady flow along the channel was checked with the same conditions as the first step, with the difference that the input discharge is variable in time.

**Results:** The results showed that when the cross-section of the main 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 upstream and downstream width trapezoidal section, and flow depth in steady flow conditions are 0.96, 0.88, and 0.98, respectively, and in unsteady flow conditions, the average relative difference obtained at parameters upstream and downstream width trapezoidal section, and flow depth in steady flow conditions are 1.12, 1.15 and 1.05, respectively. According to the sediment transport equations available in the software, the England-Hansen sediment transport relationship chosen as the appropriate relationship for the parameters of the channel dimensions, which can be more predictable to laboratory values.

**Conclusion:** An stable alluvial channel with a bankfull, when subjected to flooding, tilts towards a new stable channel. Under steady flow conditions, estimating the results of the depth and width of a stable alluvial channel in the MIKE21 model is more accurate than the results obtained from unsteady flow. Also, the values of width, depth and sediment concentration predicted by the above software are better estimated than the sustainable channel design methods such as brownlie, van rajin and WBP. In all models, the width of the channel increases rapidly over the first 3 hours, and then approaches the balance stage and the channel erosion rate decreases. As the discharge increases up to 15 liters per second, the depth and width of the channel is more severe and then these changes are almost constant.

---

Cite this article: Maleki, Amirsajad, Azizyan, Gholamreza, Hashemi Monfared, Seyed Arman. 2023. Numerical investigation of the cross-section dimensions changes of the regime channel under steady and unsteady over-bank flows. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (1), 1-26.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20862.3603

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## مطالعه عددی تغییرات ابعاد مقطع رژیم کانال تحت جریان‌های دائمی و غیردائمی سیلابی

امیر سجاد ملکی<sup>۱</sup> (id)، غلامرضا عزیزیان<sup>۲\*</sup> (id)، سید آرمان هاشمی منفرد<sup>۳</sup> (id)

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران. رایانامه: [malekiamirsajad@pgs.usb.ac.ir](mailto:malekiamirsajad@pgs.usb.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران. رایانامه: [g.azizyan@eng.usb.ac.ir](mailto:g.azizyan@eng.usb.ac.ir)
۳. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران. رایانامه: [hashemi@eng.usb.ac.ir](mailto:hashemi@eng.usb.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: سیلاب یکی از حوادث طبیعی است که باعث تغییرات چشم‌گیر ریخت‌شناسی در بستر رودخانه‌ها و اراضی مجاور آن‌ها می‌شود. این جابجایی‌ها و تغییرات ممکن است خسارات مالی و جانی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. از این‌رو نقش مطالعات ریخت‌شناسی در رودخانه‌ها، تعیین کمی و کیفی عکس‌العمل رودخانه و پیش‌بینی روند تغییرات کوتاه‌مدت و درازمدت آن تحت جریان‌های سیلابی از موضوعات مهم در مهندسی رودخانه است. در جریان‌های سیلابی، تداخل جریان در مقطع اصلی کانال و سیلاب‌دشت، باعث انتقال مومنتم و پیچیدگی در الگوی جریان از کانال اصلی به سیلاب‌دشت می‌گردد. به دلیل دینامیکی بودن این وقایع از معیارهای آماری، تجربی و نیمه تجربی به منظور تعیین ابعاد کانال‌های پایدار رژیمی استفاده می‌گردد. امروزه استفاده از مدل‌های دوبعدی برای بررسی رفتار رژیم کانال‌ها نسبت به روش‌های تجربی که جریان یک‌بعدی فرض می‌شود، برتری دارد. در رابطه با بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در کانال‌های آبرفتی مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بسیاری انجام شده است اما به صورت عددی مطالعه چندانی صورت نگرفته است. در این پژوهش، رفتار و هندسه کانال ذوزنقه‌ای مرکب با استفاده از مدل MIKE21 برای دو نوع جریان دائمی و غیردائمی سیلابی بررسی شده است. ابعاد نهایی مقطع رژیم کانال به دست آمده از مدل‌سازی تحت جریان دائمی، اختلاف کمتری با مقادیر مشاهداتی در مقایسه با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی تحت جریان غیردائمی را نشان داد.
تاریخ دریافت: ۰۱/۰۹/۱۹ تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۲/۳۱	
واژه‌های کلیدی: جریان دائمی، جریان غیردائمی، سیلاب، مقطع رژیم، MIKE21	
مواد و روش‌ها: 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 باشد. ابتدا مقطع	

کانال دوزنقه‌ای مرکب با مرزهای فرسایش‌پذیر تحت جریان دائمی مقطع پر توسعه داده شد و سپس رفتار و هندسه کانال دوزنقه‌ای توسعه‌یافته تحت جریان سیلابی دائمی و غیردائمی مورد مطالعه قرار گرفت. در گام اول مدل‌سازی جریان دائمی، شرایط جریان در کانال در یک نقطه معین نسبت به زمان ثابت است که به معنی یکسان بودن سرعت در طول جریان و عمق متوسط جریان است. در گام دوم مدل‌سازی، بررسی جریان غیردائمی در طول کانال با شرایط مشابه گام اول بررسی شد با این تفاوت که دبی ورودی به صورت متغیر در زمان است.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد هنگامی که مقطع اصلی 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 نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در پارامترهای عرض بالا و پایین مقطع دوزنقه‌ای و همچنین عمق جریان در شرایط جریان دائمی به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۸۸ و ۰/۹۸ و در شرایط جریان غیردائمی نیز متوسط اختلاف نسبی به دست آمده پارامترهای عرض بالا و پایین مقطع دوزنقه‌ای و عمق جریان به ترتیب ۱/۱۲، ۱/۱۵ و ۱/۰۵ است. با توجه به معادلات انتقال رسوب موجود در نرم‌افزار، رابطه انتقال رسوب انگلند هانسن به عنوان رابطه انتقال رسوب مناسب برای پارامترهای ابعاد کانال انتخاب گردید که توانست پیش‌بینی نزدیک‌تری به مقادیر آزمایشگاهی داشته باشد.

**نتیجه‌گیری:** یک کانال آبرفتی مقطع پر پایدار، هنگامی که در معرض سیلاب قرار می‌گیرد، به سمت یک کانال پایدار جدید متمایل می‌گردد. در شرایط جریان دائمی، برآورد نتایج عمق و عرض کانال پایدار در مدل MIKE21 در مقایسه با نتایج حاصل از جریان غیردائمی دقت بیشتری دارد. همچنین مقادیر عرض، عمق و غلظت رسوب پیش‌بینی شده کانال توسط نرم‌افزار فوق نسبت به روش‌های طراحی کانال پایدار مانند برونلی، ون‌راین و WBP بهتر تخمین زده شده است. در تمامی مدل‌ها، عرض کانال تقریباً طی ۳ ساعت ابتدایی به سرعت افزایش می‌یابد و پس از آن به مرحله تعادل نزدیک می‌شود 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.

استناد: ملکی، امیر سجاده، عزیزبان، غلامرضا، هاشمی منفرد، سید آرمان (۱۴۰۲). مطالعه عددی تغییرات ابعاد مقطع رژیم کانال تحت جریان‌های دائمی و غیردائمی سیلابی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۰(۱)، ۲۶-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20862.3603



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

مطالعه سیلاب به علت خسارت جانی و مالی فراوان، همواره مورد توجه پژوهشگران است. بررسی بستر سیلابی می‌تواند راهکارهای مناسبی برای کاهش این پدیده در اختیار مدیران و پژوهشگران قرار دهد (۱). سیل زمانی رخ می‌دهد که رقوم سطح آب از مقطع اصلی رودخانه بالا رفته و وارد دشت‌های سیلابی گردد. در چنین شرایطی مقطع رودخانه یا کانال را مقطع مرکب می‌نامند. مقاطع مرکب از ترکیب مقطع اصلی و دشت‌های عریض سیلابی تشکیل شده است. از جمله کاربرد مقاطع مرکب در کانال‌های سیلاب بر، مقاطع لایروبی رودخانه، کانال‌های انتقال آب و طراحی شبکه‌های آبیاری است (۲).

مباحث مربوط به شناخت و تعیین هندسه مقطع پایدار کانال همراه با بستر و دیواره‌هایی با تغییرپذیری اندک، به طوری که قادر به انتقال بار رسوبی بدون رسوب‌گذاری و یا فرسایش مجدد باشند، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است. از آنجاکه عوامل مختلفی بر پایداری کانال‌ها مؤثر بوده و باید کانال پایدار قادر به انتقال دامنه وسیعی از جریانات باشد، بنابراین مفهوم و نظریه رژیم کانال‌ها مطرح گردید. انتقال یک حجم معینی از آب همراه با مقدار معینی از رسوب با شرط تثبیت طبیعی ابعاد هندسی (عرض، عمق و شیب) رژیم کانال گفته می‌شود (۳). یکی از عوامل برهم‌زننده تعادل شدت جریان، رسوب ورودی و خروجی به رودخانه‌ها و تغییر در رفتار و ریخت‌شناسی رودخانه، وقوع سیلاب است. زمان زیادی از درک این حقیقت که یک کانال آبرفتی هر سطح مقطعی که بشرط طبیعت برای آن ایجاد کرده، با گذشت زمان یکسان نبوده بلکه با برقراری جریان اقدام به ایجاد کانال به‌خصوصی با اصلاح مشخصات هندسه اولیه خود می‌نماید که در طولانی مدت هندسه این کانال توسط جریان تغییر نمی‌یابد. با توجه به این امر مشخصات رژیم جریان مورد توجه پژوهشگران است زیرا کانال رژیم به کم‌ترین حفاظت و در نتیجه

نیازمند هزینه‌های کم‌تری برای نگهداری است (۴). در ادامه با بروز سیل و وارد شدن آب به دشت‌های 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 رقوم سیلاب و ایجاد اختلاف سرعت در مرز پیوند میان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، اصطکاک زیادی در اثر برهم‌کنش جریان ایجاد شده که به دنبال آن فرم بستر، پایداری دینامیکی و عملکرد هیدرولیکی پیچیده‌تری خواهد داشت. انجام مطالعات آزمایشگاهی علاوه بر زمان به هزینه و دقت بالایی نیاز دارد که در بیش‌تر موارد راه‌حل مناسب و مقدروری نیست. از طرفی استفاده از یک مدل عددی و تحلیلی به دلیل ارائه نتایج دقیق، از اعتبار بیش‌تری برخوردار بوده که هزینه کم‌تری دارد. داکال و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی روش‌های شبیه‌سازی جریان در رودخانه آبرفتی با استفاده از مدل‌های HEC-RAS, CCHE2D و MIKE 21 پرداختند. هدف از این کار بررسی ویژگی‌های اصلی، معادلات حاکم و محدودیت‌های مشترک مدل‌های عددی فوق است. انتخاب مدل مناسب برای یک رودخانه بستگی به هدف مطالعه، ویژگی رودخانه، توانایی مدل برای شبیه‌سازی مؤثر مسئله، در دسترس بودن داده‌ها برای کالیبراسیون مدل و زمان دارد. به‌طور معمول مدل‌های رسوبی یک‌بعدی در مقیاس منطقه‌ای یا رودخانه‌ای اعمال می‌شود، درحالی‌که مدل‌های دوبعدی در مقیاس محلی استفاده می‌گردد (۵). کماسی و داودی (۲۰۱۹) به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب و رسوب در رودخانه مهربان توسط نرم‌افزار عددی MIKE باهدف برآورد میزان بار رسوبی وارد شده در محدوده مطالعاتی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با داده‌های جریان غیردائمی و داده‌های ژئومتری جمع‌آوری شده توسط شرکت مشاور داشته و می‌توان از این نرم‌افزار در پیش‌بینی میزان انتقال رسوب در رودخانه مهربان استفاده نمود (۶). اسلام و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی

### مواد و روش‌ها

توصیف شرایط آزمایشگاهی: آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک پروفیسور نواک دانشگاه نیوکاسل انگلستان در دو مرحله A و B (دو سری (A و B)) انجام شده است. کانال مورد مطالعه متشکل از دو پهنه سیلابی و یک کانال اصلی است. این کانال به طول ۲۲ متر و عرض ۲/۵ متر بوده که ۱۸ متر آن با ماسه به عمق ۰/۶ متر پر شده و قطر میانه ذرات آن  $D_{50} \sim 1 \text{ mm}$  است. چهار متر باقی‌مانده در طول کانال به دو مخزن یکی در ابتدای کانال و دیگری در انتهای آن تقسیم شده و توسط یک لوله به یکدیگر متصل است. عمق قابل فرسایش کانال ۰/۶ متر و همچنین محدوده قابل فرسایش در عرض آن نیز بین ۰ تا ۲/۵ متر است. یک پمپ با دو لوله ورودی، یکی آب زلال و دیگری آب و رسوب بستر کانال را از مخزن انتهایی به ورودی کانال پمپ می‌نماید. دبی جریان نیز توسط یک شیرفلکه و دبی‌سنج مغناطیسی متصل به کامپیوتر تنظیم می‌شود. همچنین سرریزهای قابل تنظیم به منظور کنترل سطح آب در انتهای کانال تعبیه شده است. جهت اتلاف انرژی، کاهش اغتشاش جریان و جلوگیری از آب‌شستگی در بخش ورودی کانال از یک شبکه لانه‌زنوری<sup>۱</sup> که از شن‌هایی با دانه‌بندی درشت در ۰/۵ متر اولیه ورودی کانال، مطابق شکل ۱ استفاده شده است. رسوبات انتقالی توسط جریان نیز در پایین دست کانال توسط یک صافی جمع‌آوری و اندازه‌گیری می‌شود (۸).

تغییرات ژئومورفولوژی کانال یک رودخانه در طی جریان سیلابی که در سال ۲۰۱۸ و در رودخانه مایوراکشی هند اتفاق افتاده است، پرداختند. نتایج آنان نشان داد که در اثر سیلاب، نسبت عرض به عمق کانال افزایش یافته و شعاع هیدرولیکی آن کاهش یافته است. همچنین تقارن بین دیواره‌های کانال و بستر در اثر فرسایش از بین رفته است (۷). پیش‌بینی مقطع اصلی کانال که بیش‌تر آن‌ها طی سال‌های طولانی تحت جریان‌های سیلابی مختلف به حالت پایدار رسیده‌اند، یکی از مهم‌ترین مبانی در مهندسی رودخانه است. به دلیل دینامیکی بودن این وقایع از معیارهای آماری، تجربی و نیمه‌تجربی به منظور تعیین ابعاد کانال‌های پایدار رژیمی استفاده می‌گردد. حال اگر یک کانال آبرفتی پایدار در معرض جریان دائمی و غیردائمی سیلابی قرار گیرد، هیدرولیک جریان و رفتار کانال ممکن است پرسش‌هایی برای مهندسان ایجاد نماید. در این زمینه می‌توان به پژوهش، هیدرا (۲۰۰۲) اشاره کرد که در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی پایداری کانال‌های آبرفتی تحت جریان‌های سیلابی دائمی بر روی کانال‌های فرسایش‌پذیر پرداخت. از این‌رو پژوهش حاضر در ادامه کار این پژوهش‌گر از طریق شبیه‌سازی عددی جریان‌های دائمی و غیردائمی سیلابی و همچنین معادلات انتقال رسوب در مقاطع مرکب با استفاده از نرم‌افزار MIKE21، به بررسی مقاطع رژیم بر اثر عبور جریان دائمی و غیردائمی سیلابی می‌پردازد.



شکل ۱- ورودی فلوم.

Figure 1. The flume entrance.

دبی‌های ۲ تا ۶ لیتر بر ثانیه اجرا گردید که در جریان مقطع پر عموماً مقطع اصلی این کانال‌ها به روش فرضیه WBP<sup>۲</sup> طراحی شدند. این روش توسط سه پژوهش‌گر وایت، بتس و پریس ارائه شده و یکی از روش‌های طراحی کانال پایدار است. مقطع پیش‌بینی شده از این روش پس از رسیدن به حالت رژیم تحت دبی مقطع پر (bankfull)، به‌عنوان مقطع اولیه برای بررسی تغییرات مقطع تحت جریان‌های سیلابی با دبی‌های ۲۵ و ۱۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. برنامه کامل آزمایش‌های اجرا شده در آزمایشگاه هیدرولیک پروفیسور نواک دانشگاه نیوکاسل انگلستان برای جریان مقطع پر در جدول ۱ ارائه گردیده است که به‌عنوان مقطع عرضی اولیه برای آزمایش‌ها در کانال اصلی می‌باشد (۹).

جهت مطالعه رفتار کانال اصلی در جریان سیلابی، جریان به‌صورتی انتخاب گردیده است که پهنه‌های سیلابی در حالت قبل از آستانه حرکت قرار داشته باشند. این کار منجر به اندازه‌گیری شدت انتقال رسوب کانال اصلی در زمان سیلابی شدن جریان می‌شود و فرسایشی در پهنه‌های سیلابی اتفاق نخواهد افتاد. مطالعه هیدرولیک کانال‌های دارای جریان سیلابی که به آن کانال مرکب نیز گفته می‌شود با مرزهای متحرک<sup>۱</sup> تقریباً متفاوت از مرزهای ثابت است. به‌عنوان مثال، رابطه بین دبی جریان و ارتفاع آب بر روی پهنه‌های سیلابی را با افزایش دبی در کانال مرکب می‌توان مطالعه نمود، درحالی‌که در یک کانال آبرفتی جریان سیلابی با افزایش میزان دبی، شکل کانال اصلی تغییر می‌یابد. از این‌رو شماری آزمایش با

جدول ۱- اطلاعات اولیه کانال‌های دوزنقه‌ای مدل‌سازی شده جریان مقطع پر پیش‌بینی شده به‌وسیله روش WBP.

**Table 1. Basic information of modeled trapezoidal channels of bank-full flow predicted by WBP method.**

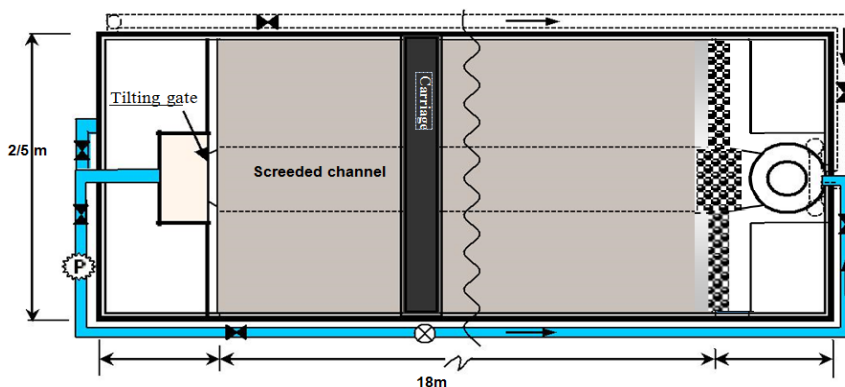
عرض بالا Width Top B(mm)	عمق Depth d(mm)	شیب جانبی Side slope z	عرض پایین Width Bottom b(mm)	شیب بستر Slope Bed S	دبی Discharge Q(l/s)	آزمایش Labor	
						شماره Number	سری Series
390	45	1	300	0.0017	5	A1	
394	47	1	300	0.0017	6	A2	A
302	41	1	220	0.0017	4	A3	
382	41	1	300	0.002	2	B1	
336	38	1	260	0.002	4	B2	B
394	47	1	300	0.002	6	B3	

1- Movable Bed

2- White, Bettess and Paris

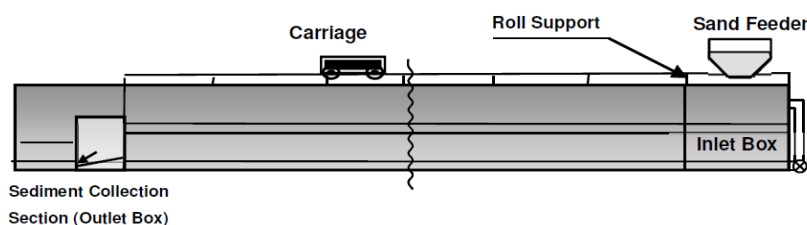
دو سری آزمایش، مقطع کانال اصلی به صورت دوزنقه‌ای مرکب می‌باشد و کانال نیز با جداره‌های فرسایش‌پذیر و صاف به‌طور مستقیم ساخته شده که مصالح آن برای پهنه‌های سیلابی نیز استفاده شده است. شکل ۲ شماتیک پلان و نمای جانبی کانال را نشان می‌دهد.

یکی از مشخصه‌های اصلی کانال پایدار، داشتن بستر متحرک است که در آن فرسایش یا رسوب‌گذاری اتفاق نمی‌افتد (۹). در مرحله اول (سری اول (A))، مقطع طراحی شده به روش WBP با جریان مقطع پر و شیب بستر ۰/۰۰۱۷ توسعه یافته و سپس جریان سیلابی در کانال توسعه یافته با دبی پیک ثابت (سری دوم (B)) با شیب ۰/۰۰۲ برقرار شد. بنابراین در هر








(الف)

(A)



(ب)

(B)

Sand , Valve , Flow meter , Pump , Gravel 

شکل ۲- کانال آزمایشگاهی (الف) و نمای جانبی (ب).

Figure 2. Laboratory Channel (A) and Side View (B).

حرکت قرار می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ مقادیر دبی آمده است، در صورتی که از دبی ۶ لیتر بر ثانیه در کانال اصلی 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

در گام اول مدل‌سازی جریان دائمی، شرایط جریان در کانال در یک نقطه معین نسبت به زمان ثابت می‌باشد که به معنی یکسان بودن سرعت در طول جریان و عمق متوسط جریان است. در آزمایش‌های سری B که شیب بیشتری دارد، حداکثر جریان ۲۲ لیتر بر ثانیه پهنه‌های سیلابی را در آستانه

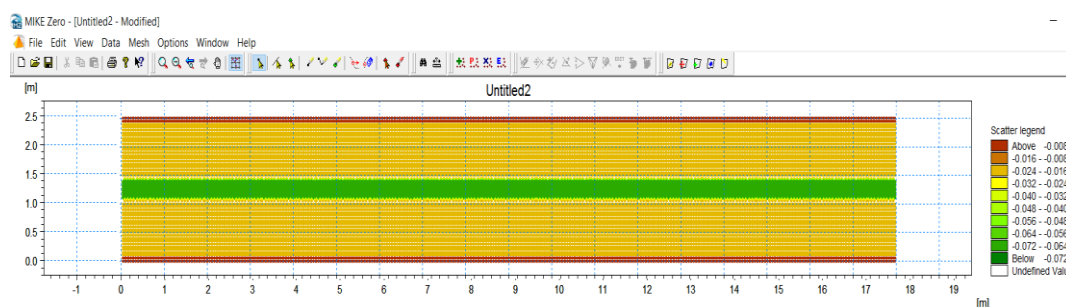


از جمله معادلات مومنتوم، انتقال- انتشار و پیوستگی از روش حجم محدود میان سلولی استفاده می‌کند. مدول محاسباتی اصلی کل نرم‌افزار MIKE21، مدول هیدرودینامیکی می‌باشد که بسیاری از مدول‌های دیگر بر پایه نتایج به دست آمده از اجرای مدول هیدرودینامیکی است. این مدول در محدوده گسترده‌ای از هیدرولیک و پدیده‌های مرتبط با آن کاربرد داشته و نتایج خروجی به دست آمده را به عنوان ورودی برای دیگر مدول‌های MIKE21 مانند مدول انتقال-پخش رسوب استفاده می‌کند (۹).

در راستای شبیه‌سازی، شرایط توپوگرافی و شکل کانال وارد محیط نرم‌افزار MIKE21 گردید. در همین راستا برای محدوده مورد مطالعه، جهت بالا بردن دقت مکانی و استخراج نتایج از برنامه MIKE Zero و با به کارگیری شبکه بندی نامنظم Mesh Generator استفاده شد. شکل ۳ نمایی از کانال ایجاد شده در Mesh Generator را نمایش می‌دهد که در ادامه به مش بندی آن پرداخته می‌شود.

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. در گام دوم مدل‌سازی، جریان غیردائمی در طول کانال با شرایط مشابه گام اول با این تفاوت که دبی ورودی به صورت متغیر در زمان در نظر گرفته شود، بررسی شد. برای این منظور زمانی که کانال در اثر جریان مقطع پر پایدار، سیلابی گردد منجر به تغییر فرم کانال اصلی خواهد شد که در نتیجه عمق روی پهنه سیلابی از آن مقداری که برآورد شده، متفاوت خواهد بود. 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 بود. در آزمایشگاه ۳ مقطع عرضی میانی به فواصل ۳ متر از دیگری در طول کانال اندازه‌گیری گردید که هر یک از این مقاطع به دوزنقه تبدیل شده و میان ابعاد مقاطع، میانگین آن‌ها به عنوان ابعاد پایدار مقطع ثبت گردید.

**معرفی مدل و مراحل اجرا:** مدل عددی مورد استفاده در این پژوهش، بسته نرم‌افزاری MIKE21 است. این مدل جهت گسسته سازی معادلات حاکم بر فرآیندها

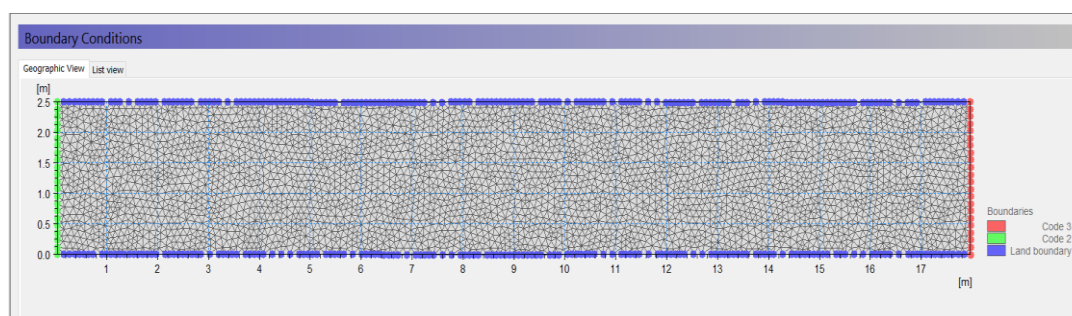


شکل ۳- کانال ایجاد شده در Mesh Generator.

Figure 3. Channel created in Mesh Generator.

Specified level، 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.

به منظور تعیین شرایط مرزی مسأله مطابق شکل ۴، شرط مرزی بالادست را Specified discharge با کد ۲ که به دو صورت ثابت در زمان و متغیر در زمان تعریف گردیده و واحد ورودی دبی، مترمکعب بر ثانیه مشخص شد. شرط مرزی پایین‌دست نیز

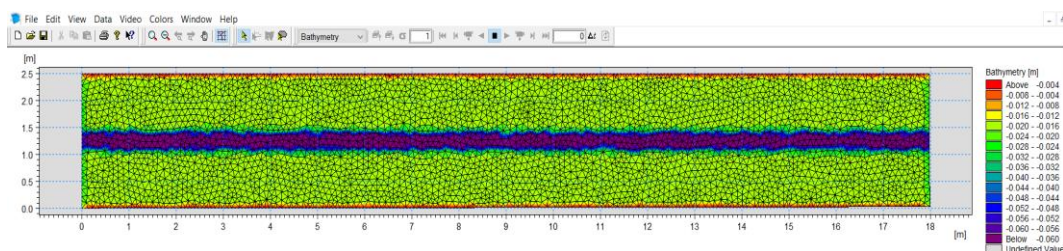


شکل ۴- اعمال کد به شرایط مرزی در کانال.

Figure 4. Apply the code to channel boundary conditions.

بحث کورانته بوده که وابسته به زمان و مکان است و باید عدد حاصل تقسیم تغییرات زمانی به مکانی کم‌تر از ۱ شود. از آنجایی که باید میزان جریان و تراز سطح آب در مدل‌سازی با مقادیر مشاهداتی به میزان مشابه برسد باید با تغییر ابعاد شبکه محاسباتی تا جایی که هر اندازه مش ریزتر شود تأثیری بر میزان دبی و تراز سطح آب نداشته باشد. در ادامه با توقف افزایش تعداد المان‌ها در این مرحله با ریزتر شدن شبکه و بررسی اختلاف تراز سطح آب و با در نظر گرفتن میزان خطای نسبی در محاسبات صورت گرفته، اندازه سلول شبکه در این پژوهش  $0.0006$  مترمربع تعیین شد. همچنین با ریزتر شدن شبکه‌بندی دقت محاسبات و به تبع آن هزینه محاسباتی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین انتخاب شبکه محاسباتی باید با توجه به دقت و هزینه محاسباتی انجام گردد. در این پژوهش از مش‌بندی نامنظم مثلثی به‌منظور گسسته‌سازی محیط‌های آبی مدنظر استفاده گردید که بر پایه معادلات دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق می‌باشد. در شکل ۵ شبکه‌بندی استفاده‌شده در مدول هیدرودینامیک را نشان می‌دهد.

با توجه به این که مدل استفاده‌شده دوبعدی است، ابتدا با ایجاد شبکه محاسباتی در *Mesh Generator*، باید به‌منظور مدل‌سازی جریان میزان دبی جریان ورودی، عمق نرمال تعریف‌شده و سپس اندازه سلول مناسب جهت شبکه‌بندی تعیین گردد. در ادامه برای تحلیل جریان در نرم‌افزار *MIKE21* از ماژول *Flow Model FM* استفاده گردید. 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 پروژه و صرفه‌جویی در زمان لازم برای مدل‌سازی عددی و استفاده هدف‌دار از اطلاعات عمق بستر، از قابلیت طراحی مش‌بندی انعطاف‌پذیر در مدل ریاضی بهره‌گیری شده است. ابعاد مش‌ها در سراسر محدوده مورد مطالعه به‌صورت یکنواخت انتخاب شده است. بر این اساس مش‌بندی مدل با  $120678$  المان و  $61642$  گره محاسباتی انجام گردیده است. زمانی که اختلاف مقادیر یکی از پارامترهای محاسباتی براساس اندازه سلول و همچنین معیارهای ارزیابی به‌منظور اختلاف حداقل با مقادیر آزمایشگاهی، کم‌تر از  $0.5\%$  گردد که این امر با توجه به



شکل ۵- شبکه بندی استفاده شده در مدول هیدرودینامیک.

Figure 5. The grid used in the hydrodynamics module.

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 در سه حالت متفاوت بدون گردابی، فرمول اسمانگورینسکی و فرمول گردابی ثابت است که در این پژوهش با توجه به دوبرعی بودن مدل و انتخاب فرمول اسمانگورینسکی توسط نرم‌افزار به عنوان پیش فرض برای کانال‌ها و رودخانه‌ها، باید ضریب آن نیز مشخص گردد. اسمانگورینسکی در سال ۱۹۶۳ پیشنهادی ارائه داد که مقیاس زیرشبکه انتقالات به وسیله تأثیر ویسکوزیته گردابی بیان گردد که با مقیاس طول مشخصه رابطه دارد. مقیاس زیرشبکه ویسکوزیته گردابی به شرح زیر است (۱۰).

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

که در آن،  $l$  طول مشخصه،  $c_s$  یک ثابت و  $S_{ij}$  نرخ تغییر شکل بوده که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

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

ضریب  $c_s$  باید در محدوده ۰/۲۵ تا ۱ باشد. باید توجه داشت که در زمان استفاده از رابطه آشفتگی

روش حل: در نرم‌افزارهای مختلف به منظور شبیه‌سازی رودخانه‌ها از معادلات آب‌های کم‌عمق استفاده می‌گردد که در آن تغییرات فشار در جریان‌های یکنواخت و دائمی با عمق به صورت خطی بوده و فشار هیدرو استاتیک  $P = \gamma h$  تعریف می‌شود.  $\gamma$  وزن مخصوص و  $h$  عمق آب است. با توجه به رابطه ۱ و رابطه ۲ با انتگرال‌گیری از معادلات تکانه دوبرعی و معادله پیوستگی، معادلات دوبرعی آب کم‌عمق به دست آمده می‌آید (۱۰).

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

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

که در آن‌ها،  $h$  (m) عمق آب کل،  $\eta$  ارتفاع سطح و  $d$  (m) عمق آب ساکن نام دارد. نماد میانگین یا بار نیز بیانگر مقدار میانگین عمقی است. به عنوان نمونه  $\bar{u}$  و  $\bar{v}$  (m/s) و سرعت‌های میانگین عمقی در راستای  $x$  و  $y$  بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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

در انتها به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از مدل MIKE21 با داده‌های آزمایشگاهی، از چهار روش آماری شامل: ضریب همبستگی ( $R^2$ )، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، اختلاف نسبی (DR) و میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی (MARE) استفاده شده است.

### نتایج و بحث

**کالیبراسیون و صحت‌سنجی:** به منظور کالیبراسیون مدل، نتایج مدل با اطلاعات مشاهداتی معین در یک بازه زمانی استخراج شد. همین‌طور به منظور رسیدن به یک سازگاری بهینه میان محاسبات مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مدل مانند ضریب اصطکاک کف و جریان هیدرودینامیکی انتخاب شد و شبیه‌سازی انجام گردید. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی انتقال رسوب نیازمند اجرای مدول هیدرودینامیکی به منظور محاسبه شرایط جریان و کانال موردبررسی می‌باشد. ظرفیت انتقال رسوب در هر گره از شبکه کانال تعریف شده به مدل نیز با استفاده از اطلاعات غلظت رسوب، اندازه و دانه‌بندی ذرات رسوبی، عمق آب و مشخصات جریان به‌عنوان داده‌های ورودی، تعیین می‌گردد. اندازه دانه‌بندی در این نرم‌افزار  $D_{50}$  است که نماینده اندازه دانه برای شبکه نقطه مشخص در شبیه‌سازی مدل در نظر گرفته شده است. با توجه به معادلات انتقال رسوب موجود در مدل MIKE21، رابطه انتقال رسوب انگلند هانسن با مقدار متوسط‌گیری ضریب همبستگی ۰/۹۵ به‌عنوان رابطه مناسب برای پارامترهای ابعاد کانال انتخاب گردید. در این مرحله برای نتایج رسوب با در نظر گرفتن معادله انتقال رسوب انتخاب شده، به منظور تعیین پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی رسوب نرم‌افزار کالیبره شد. از جمله پارامترهایی که در نرم‌افزار MIKE21 جهت شبیه‌سازی انتخاب می‌شود می‌توان

اسماگورینسکی، منجر به افزایش زمان موردنظر برای پردازش داده‌ها خواهد شد. در این پژوهش رابطه اسماگورینسکی به منظور پایداری مدل ۰/۲۸ استفاده شده است.

زبری بستر و یا مقاومت توسط ضریب شزی و یا عکس ضریب مانینگ به مدل معرفی می‌شود. این ضریب نشان‌دهنده اثر اصطکاک کف بر الگوی جریان در مدل بوده و بین عکس  $M (s/m^{1/3})$  ضریب مانینگ و  $C (m^{1/2}/s)$  ضریب شزی رابطه زیر برقرار است:

$$C = MR^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

که در آن،  $R (m)$  شعاع هیدرولیکی است. با توجه به مقدار به دست آمده در آزمایشگاه ضریب مانینگ ۰/۱۵ است که مقدار عکس آن یعنی ۶۶ به مدل معرفی گردید.

پایداری و همگرایی در مدل‌هایی که با روش‌های عددی کار می‌کند به مشخصات پارامترهای خاصی مانند گام مکانی و گام 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 می‌تواند برابر ۱ باشد. در راستای شبیه‌سازی کاربر باید مدت زمان اجرا، گام زمانی را مشخص نماید به نحوی که با پدیده پرش هیدرولیکی و ناپایداری مواجه نشود. فرمول عدد کورانت به صورت زیر است (۱۰).

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

بر اساس کانال آزمایشگاهی و شبکه ایجاد شده در این پژوهش، ۳۰ ثانیه مقدار مناسبی برای گام زمانی بوده و زمان اجرای نرم‌افزار در مقایسه با زمان انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه، بیش‌تر در نظر گرفته شده و زمان گرم شدن مدل حدفاصل ۱۰۰ تا ۱۸۰ ثانیه است.

به نوع معادله انتقال رسوب، تعداد محاسبات در هر گام زمانی، زبری بستر، زاویه پایداری مصالح بستر و مدل آشفستگی اشاره کرد که مشاهده تغییرات نتایج حاصل از آن‌ها و حساسیت فرآیند نسبت به تغییر این پارامترها بررسی می‌شود. در این مرحله در جدول ۲ با استفاده از ۳ سری آزمایش برای واسنجی نرم‌افزار استفاده شد.

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون برای جریان مقطع پر کانال پایدار.

Table 2. Calibration results for stable channel bank full flow.

دما Temperature T (°C)	مدت‌زمان Duration (h)	عرض بالا Width Top b (mm)	عمق Depth d (mm)	عرض پایین Width Bottom b (mm)	شیب جانبی Side slope z	شیب بستر Slope Bed S	دبی Discharge Q(l/s)	سری Series
16	6.05	370	34	220	2.29	0.0017	4	A3
16	6	420	26.5	255	2.49	0.002	2	B1
16	7.01	455	31.8	315	2.47	0.002	6	B3

ابعاد مقطع عرضی را با دقت هرچه بیش‌تر در مقایسه با ابعاد کانال آزمایشگاهی برآورد نماید. با توجه به نتایج حاصل از کالیبراسیون جریان مقطع پر در جدول ۳، مدل توانسته است عرض بالا (B) و عرض پایین (b) را به خوبی برآورد کرده است.

در این پژوهش، از زاویه پایداری استخراج شده در نتایج آزمایشگاه ۳۳<sup>o</sup> استفاده گردید. دمای آب از جمله پارامترهای اثرگذار در روابط انتقال رسوب است که تأثیر آن در مقدار لزجت دینامیکی آب است. دمای در نظر گرفته شده در آزمایشگاه نیز به عنوان دمای آب قرار داده شد. در این مرحله سعی شده است تا مدل

جدول ۳- نتایج پارامترهای آماری در مرحله کالیبراسیون برای ارزیابی مدل با جریان مقطع پر.

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

DR	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE	ارزیابی Evaluation
1.02	0.22	0.94	0.18	عرض پایین Width Bottom
0.97	0.15	0.97	0.2	عرض بالا Width Top
0.89	0.5	0.35	0.46	شیب جانبی Side slope
0.87	0.1	0.96	0.14	عمق Depth

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 در مجموعه داده‌های مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی مورد تأیید قرار داد. هنگامی که حداقل شرایط سازگاری قابل قبول محقق نگردد، در این صورت باید از تجزیه و تحلیل برای مشخص کردن دلایل ممکن جهت پالایش و بازبینی مدل به منظور تفاوت‌های موجود میان نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار و داده‌های اندازه‌گیری شده، انجام گیرد. در این مرحله از ۳ آزمایش دیگر برای صحت‌سنجی جهت تأیید کالیبراسیون استفاده گردیده و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

صحت‌سنجی آخرین مرحله‌ای است که باید بعد از مرحله کالیبراسیون انجام شود. برای این منظور از اطلاعاتی که در مرحله کالیبراسیون استفاده نشده است، بهره‌گیری می‌شود؛ بنابراین مدل صحت‌سنجی شده با اطلاعات جدید اجرا شده و نتایج محاسبات به دست آمده توسط نرم‌افزار با اطلاعات اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. در صورتی که نتایج باهم تطابق داشتند، صحت‌سنجی مدل قابل اطمینان است و می‌توان از پیش‌بینی مدل برای تغییرات آینده استفاده کرد. در غیر این صورت، جهت بررسی میزان تأثیر خطای ناشی از اطلاعات ورودی بر نتایج خروجی مدل، آنالیز حساسیت مدل انجام می‌شود؛ بنابراین مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده باید با نتایج مدل در طول

جدول ۴- نتایج پایداری کانال با جریان مقطع پر در صحت‌سنجی مدل.

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

دمای Temperature T(°C)	مدت زمان Duration (h)	عرض بالا Width Top b (mm)	عمق Depth d (mm)	عرض پایین Width Bottom b (mm)	شیب جانبی Side slope z	شیب بستر Slope Bed S	دبی Discharge Q(l/s)	سری Series
16	7	460	38	241	2.56	0.0017	5	A1
16	7.40	449	39	250	2.34	0.0017	6	A2
16	6.35	388	33.5	196	2.14	0.002	4	B2

حاصل سه تکرار است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل توانسته است مقادیر عرض پایین (b)، عرض بالا (B)، شیب جانبی (Z) و عمق (d) را به خوبی پیش‌بینی نماید.

به جهت بررسی دقت صحت‌سنجی مدل از چهار پارامتر آماری که در مرحله کالیبراسیون بیان گردید استفاده شده که با توجه به نتایج آن‌ها در جدول ۵ که

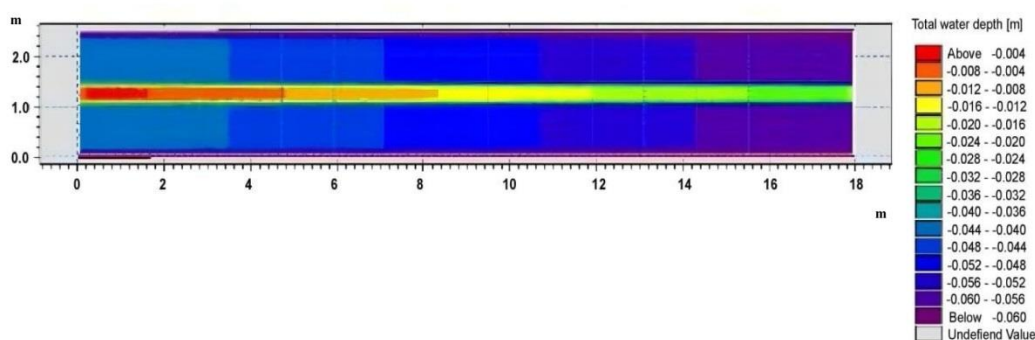
جدول ۵- نتایج پارامترهای آماری در مرحله صحت‌سنجی برای ارزیابی مدل با جریان مقطع پر.

Table 5. Statistical parameters in the Validation phase to evaluate the model with bank full flow.

DR	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE	ارزیابی Evaluation
0.98	0.1547	0.945	8.7	عرض پایین Width Bottom
0.975	0.622	0.988	4.05	عرض بالا Width Top
1.083	0.1465	0.763	10.04	شیب جانبی Side slope
0.95	0.932	0.736	7.55	عمق Depth

هنگامی که شرایط کانال از شرایط جریانی مقطع پر به جریان سیلابی تغییر کرد، غلظت رسوب نیز کاهش یافت. در آزمایش‌های سری B نیز باعث تغییرات در ارتفاع کانال گردیده و هم‌چنین از طریق ماریپیج و کم‌عمق نمودن آن، به شرایط پایدار رسیده است. در شکل ۶ تغییرات عمق آب در طول کانال پس از شبیه‌سازی عددی برای جریان دائمی را نشان می‌دهد.

نتایج مدل در جریان دائمی: 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 که 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.

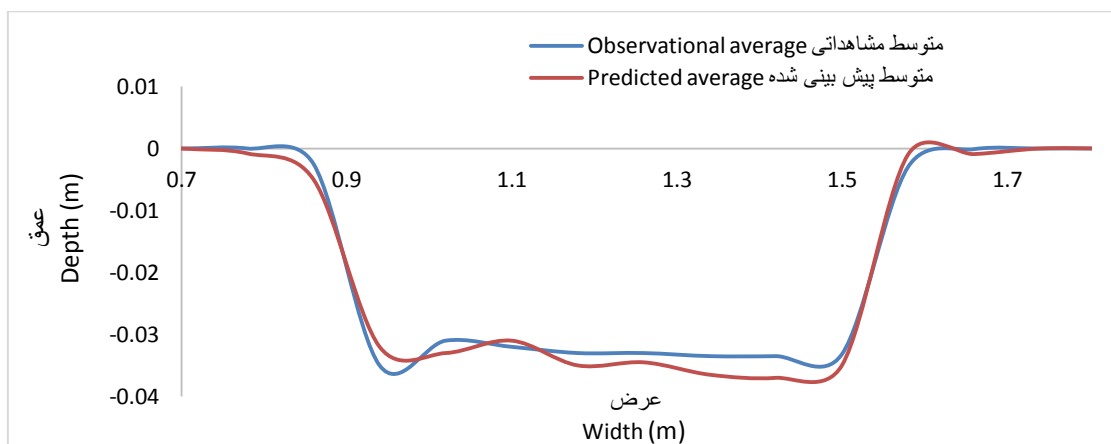


شکل ۶- تغییرات عمق آب در طول کانال پایدار در سری آزمایش A2.

Figure 6. Water depth changes along the stable channel in the A2 test series.

۳ ساعت، نرخ عریض شدن کانال کاهش یافته و سرانجام به پایداری می‌رسد. این نکته نشان‌دهنده نرخ تغییرات بیش‌تر در شبیه‌سازی نرم‌افزار می‌باشد. ارشادی و والتین (۲۰۰۵) طی مطالعه‌ای بیان کردند زمانی که کانال سیلابی است عرض کانال اصلی به سرعت افزایش می‌یابد. این مشاهدات با گوپا و فوکس (۱۹۷۴)، پیتلیک و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد؛ بنابراین هندسه کانال متفاوتی ایجاد می‌شود (۱۱).

در شکل ۷ نیز با توجه اجرای مدل در شرایط آزمایشگاهی، به دلیل صرف‌نظر از تأثیرات ابتدایی و انتهایی جریان، تغییرات متوسط سه مقطع انتخابی در فواصل ۶، ۱۱ و ۱۳ متری به‌گونه‌ای که نمایانگر وضعیت کل کانال است، نشان داده شد. در جریان دائمی، مقطع نهایی مدل به مقطع مشاهده‌ای نزدیک است. تغییرات غلظت رسوب و مقطع در مدل آزمایشگاهی در مدت‌زمان کوتاهی حدود ۵/۵ الی ۶/۵ ساعت پس از عبور جریان آب ناچیز بوده و به شرایط پایدار رسیده است، درحالی‌که در مدل بعد از گذشت

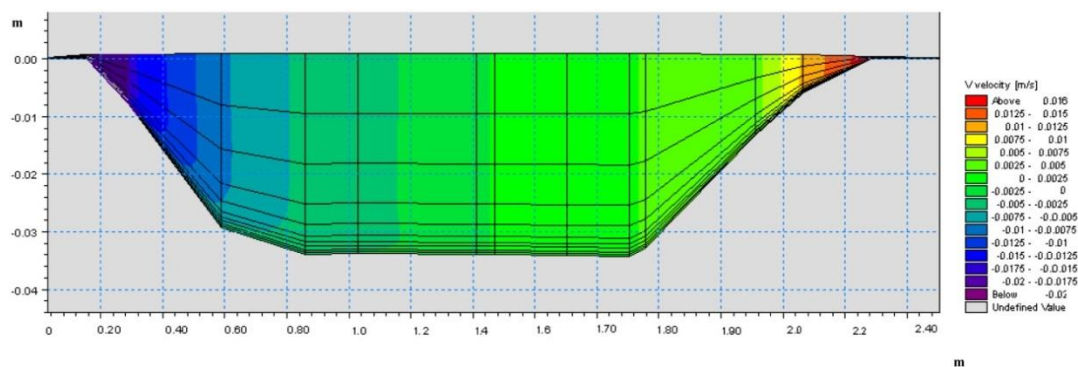


شکل ۷- متوسط مقاطع ۶ و ۱۱ و ۱۳ متری از ابتدای کانال توسعه یافته آزمایشگاهی A2 جریان دائمی.

Figure 7. The average sections of 6, 11 and 13 meters from the beginning of the developed laboratory channel A2 steady flow.

حداکثر سرعت نیز در نزدیکی سطح جریان و در وسط مقطع عرضی حدود ۰/۰۱۲ 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.

در شکل ۸ پروفیل عرضی سرعت جریان ارائه شده که تغییرات سرعت عرضی در ارتفاع مقطع را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن لایه مرزی سرعت حداقل در مجاورت کف و دیواره تقریباً ۰/۰۱۷ متر بر ثانیه برای سرعت عرضی اتفاق می‌افتد.



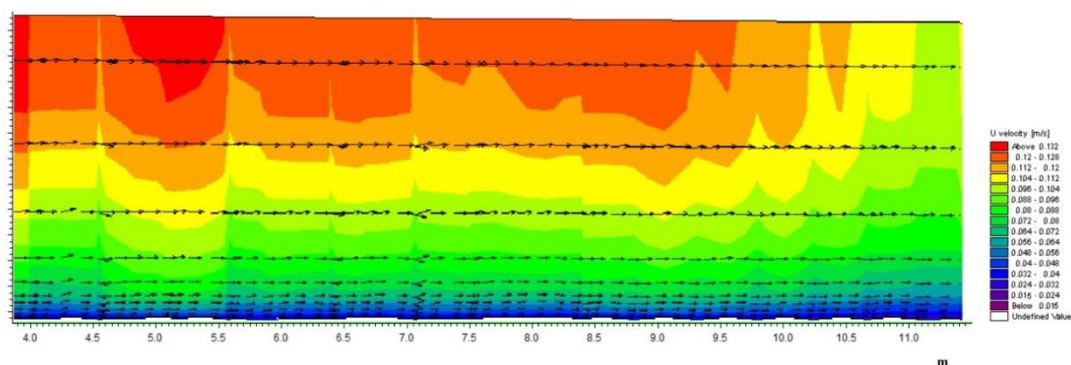
شکل ۸- توزیع سرعت عرضی در مقطع عرضی کانال A2 در مدل.

Figure 8. Transverse velocity distribution in the cross section of A2 channel in the model.

مدل در فاصله ۱۱ متر از ابتدای کانال ارائه شده است. مقدار سرعت از کف تا سطح جریان حداقل ۰/۰۱۵ و حداکثر تا ۰/۱۳ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد.

در این پژوهش معیار اصلی جریان و تراز سطح بوده است که بدین ترتیب میزان تغییرات سرعت بعد از کالیبراسیون جریان و تراز سطح استخراج گردید در شکل ۹ توزیع سرعت طولی در محور طولی کانال در



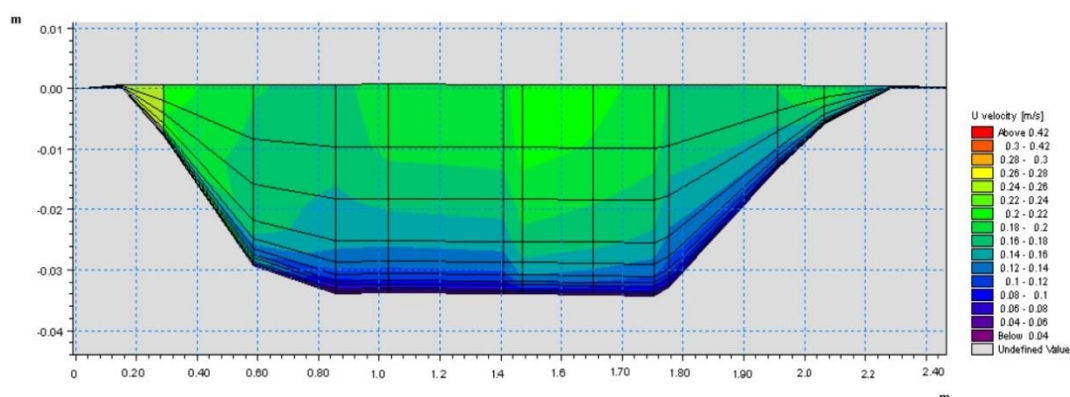


شکل ۹- توزیع سرعت طولی در محور طولی در فاصله ۱۱ متری از کانال A2.

Figure 9. Longitudinal velocity distribution in the longitudinal axis of the model at a distance of 11 meters of channel A2.

ثانیه برای سرعت طولی اتفاق می‌افتد. مقدار حداکثر سرعت نیز در نزدیکی سطح جریان و در وسط مقطع عرضی حدود ۰/۳ متر بر ثانیه برای سرعت طولی رخ می‌دهد.

در شکل ۱۰ پروفیل عرضی سرعت جریان ارائه شده که تغییرات سرعت طولی در ارتفاع مقطع را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن لایه مرزی سرعت حداقل در مجاورت کف و دیواره تقریباً ۰/۱ متر بر

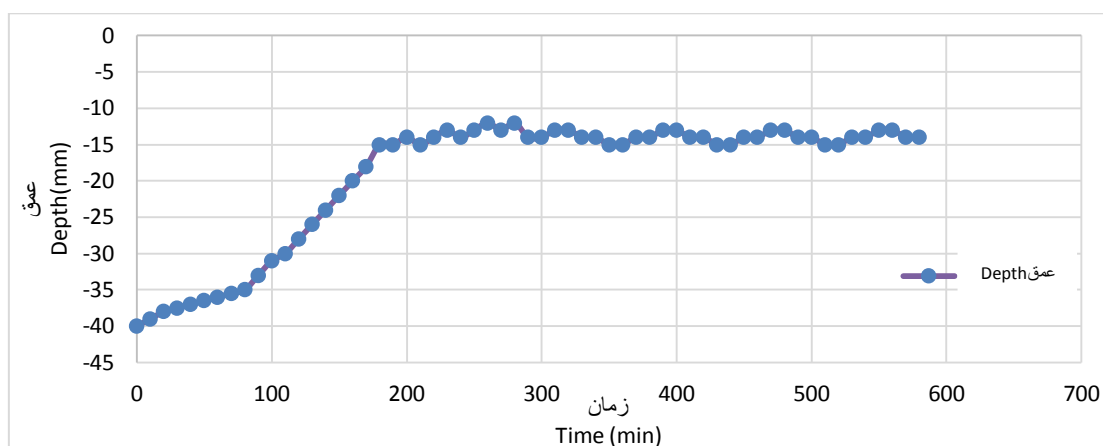


شکل ۱۰- توزیع سرعت طولی در مقطع کانال A2 در مدل.

Figure 10. Longitudinal velocity distribution in the cross section of A2 channel in the model.

است. مجموعه تغییرات عمق، عرض و غلظت رسوبات در مجاری فرسایش پذیر باعث رسیدن کانال به حالت پایدار دینامیکی خود می‌گردد. لئوپولد (۱۹۶۴) نیز به خودسازی پیوسته رودخانه‌ها تا رسیدن به شرایط پایداری اشاره می‌نماید (۱۱).

در شکل ۱۱ همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدت‌زمان ۵۸۰ دقیقه مدت‌زمان اجرای مدل MIKE21 تغییرات عمق کانال در وسط آن به نمایش گذاشته شده است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که عمق کانال در مدت ۲/۲ ساعت اول شدیدتر بوده و پس از آن تغییرات تقریباً متوقف شده

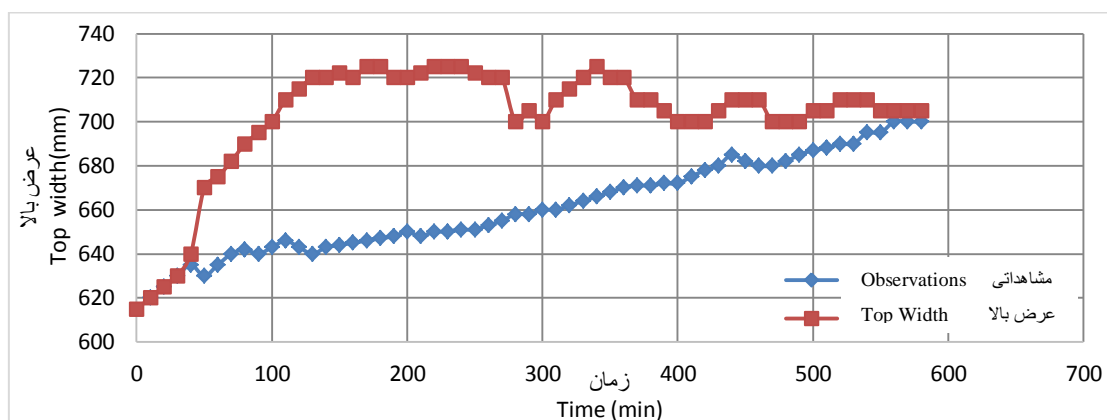


شکل ۱۱- تغییرات عمق کانال در زمان عبور جریان در کانال A2.

Figure 11. Channel depth changes during the passage of current in channel A2.

عرض توسط مدل در ۱۵۰ دقیقه اول شبیه‌سازی رخ داده است و سپس تغییرات عرض بالای کانال تقریباً ثابت می‌گردد. در واقع در بازه زمانی ۱۵۰ دقیقه نخست تقریباً ۹۰٪ تغییرات انجام شده و متوسط عرض بالای کانال در ۷۱۰ میلی‌متر ثابت می‌گردد.

در شکل ۱۲ تغییرات عرض بالا در وسط 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 دست یافته است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد تغییرات



شکل ۱۲- تغییرات عرض بالایی در زمان عبور جریان در میانه کانال A2.

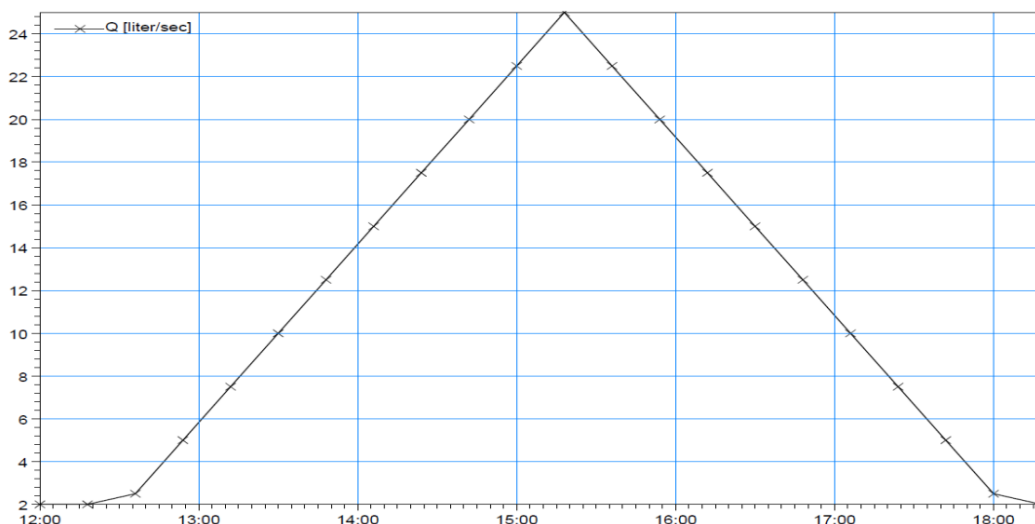
Figure 12. Changes in the top width of the channel during the passage of current in channel A2.

شد. درحالی‌که در مدل‌سازی صورت گرفته جهت مطالعه اثر جریان غیردائمی بر فرآیند تغییرات مقطع کانال‌های آزمایشگاهی سری A و B با دبی‌های ۱۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه مشابه دبی‌های جریان دائمی در مدل

نتایج مدل در جریان غیردائمی: همان‌طور که قبلاً گفته شد، در مرحله نخست تمامی آزمایش‌ها در کانال، تحت جریان دائمی یکنواخت فرآیند تغییرات مقطع کانال تا زمان رسیدن به حالت پایدار بررسی

هیدروگراف با دبی حداکثر ۲۵ لیتر بر ثانیه در شکل ۱۳ ارائه شده است. شاخه صعودی هیدروگراف در مدت زمان ۲۰۰ دقیقه به حداکثر دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و همچنین در شاخه نزولی هیدروگراف در مدت ۱۸۰ دقیقه به حداقل دبی ۲ لیتر بر ثانیه می‌رسد.

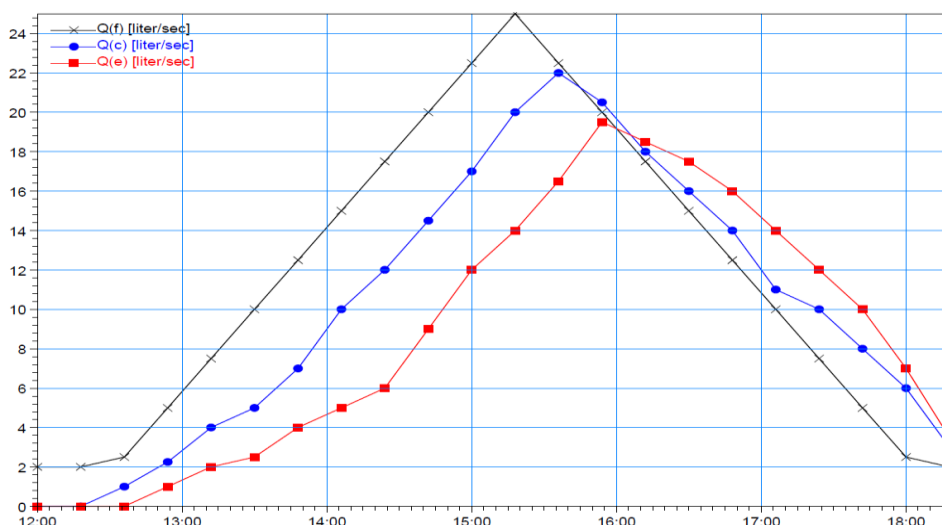
MIKE21 اجرا و جهت مقایسه نتایج استفاده گردیده است. در این حالت شرط مرزی دبی ورودی را با هیدروگراف به صورت متغیر در زمان استفاده شده در آزمایشگاه با کد ۲ برای شرایط جریان غیردائمی به مدل MIKE21 معرفی گردید که نمونه‌ای از



شکل ۱۳- هیدروگراف ورودی در ابتدای کانال B1.  
Figure 13. Inlet hydrograph at the beginning of channel B1.

زمان وقوع این دبی حداکثر به دلیل تأخیر در مدت زمان جریان در مقاطع مختلف نسبت به یکدیگر و همچنین دارا بودن حجم ذخیره مثبت در کانال قابل توجه است. اگر هیدروگراف  $f$  را به عنوان هیدروگراف ورودی و هیدروگراف  $e$  را هیدروگراف خروجی فرض نماییم، ملاحظه می‌گردد که حداکثر هیدروگراف خروجی تقریباً در محدوده تقاطع دو هیدروگراف خروجی و ورودی قرار داشته است.

در شکل ۱۴ هیدروگراف‌های سه مقطع ابتدایی که نشان‌دهنده دبی ورودی به کانال، دبی میانی و دبی انتهایی ترسیم شده که در آن‌ها میزان دبی صرفاً حاصل حل معادلات سنت و نانت مربوط به جریان غیردائمی نبوده، بلکه از حل سه معادله به صورت هم‌زمان می‌باشد که با اعمال اثر دبی رسوب و مقدار فرسایش در بستر یا رسوب‌گذاری به دست آمده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود کاهش میزان دبی حداکثر از مقطع ابتدایی تا مقطع انتهایی و افزایش

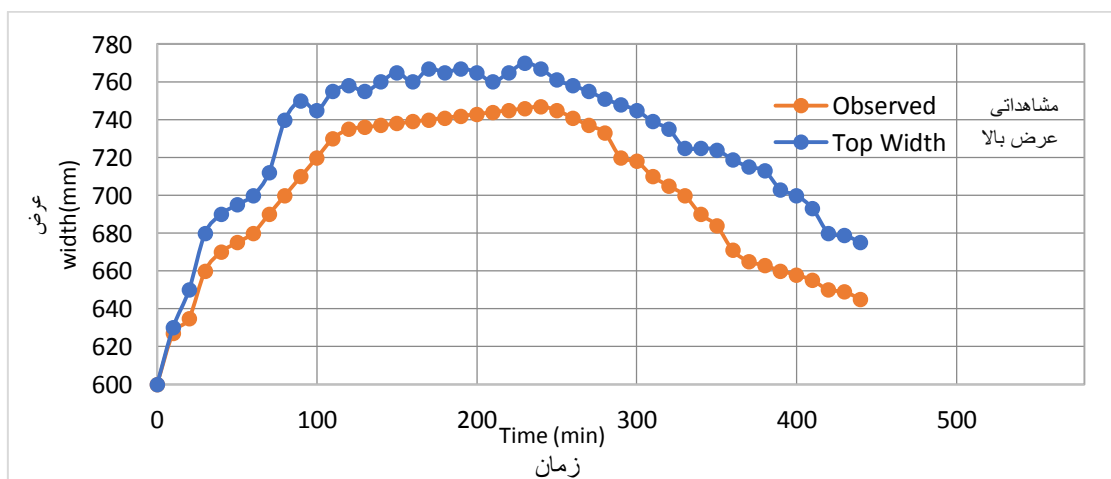


شکل ۱۴- تغییرات دبی اسمی نسبت به زمان در سه مقطع ابتدایی، میانی و انتهایی در کانال B1.

Figure 14. Flow rate name changes over time in the beginning, middle and end of the B1 channel.

به صورت تدریجی مقدار عرض کانال تا ۷۸۰ میلی‌متر افزایش یافته و پس از فروکش کردن شدت جریان به دلیل کاهش سرعت و به تبع آن منجر به کاهش عرض کانال گردید. هم‌چنین مدل عددی MIKE21 عرض کانال را در کلیه لحظات اجرا بیش‌تر از مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه به دلیل در دسترس نبودن برخی پارامترهای مورد نیاز مدل، پیش‌بینی می‌نماید.

شکل ۱۵ تغییرات عرض در حالت جریان غیردائمی را نشان می‌دهد که هیدروگراف با نرخ جریان دائمی به عنوان دبی پایه آغاز شد و دبی به تدریج افزایش یافت. در مدل با حداکثر دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه در کانال سری B1 اجرا گردید. مشاهده شد که کانال اصلی به سرعت عریض گردیده در زمانی که کانال سیلابی شد. به دلیل وجود دبی‌های کم در ابتدای تغییرات

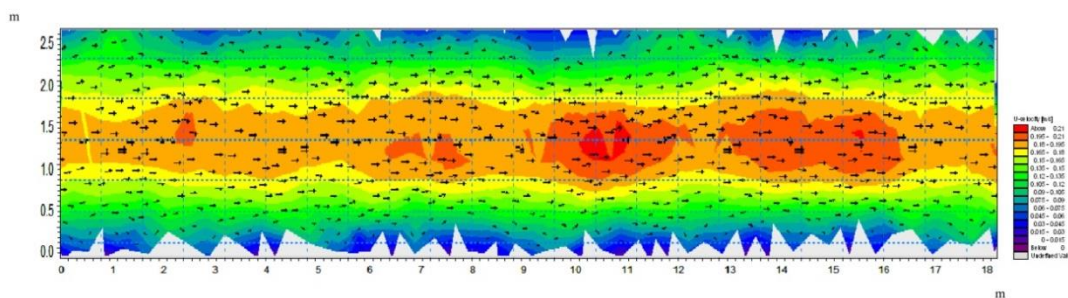


شکل ۱۵- مقایسه میزان تغییرات عرض کانال آزمایشگاه با نرم‌افزار در حالت جریان غیردائمی در کانال B1.

Figure 15. Comparing the of laboratory channel width changes with the software in unsteady flow mode in channel B1.

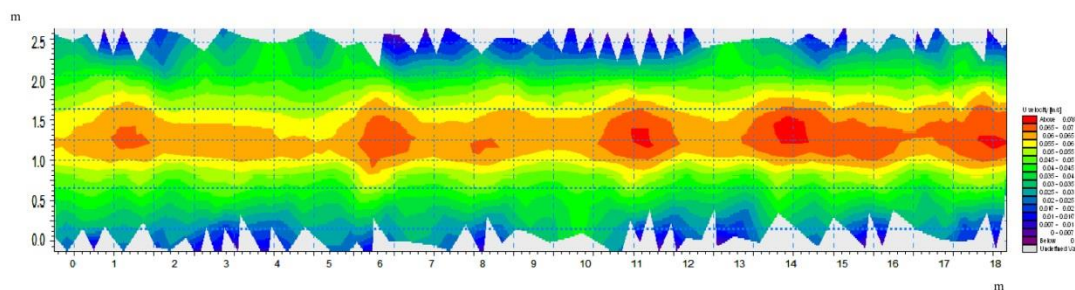
جریان جریان‌های غیردائمی با دبی بالا، در هر دو کناره کانال ایجاد می‌شوند. وجود این گردابه‌ها باعث توسعه برشی جانبی میان خطوط جریان سریع در جریان میانی و جریان‌های کندتر نزدیک به کناره می‌شود. همان‌طور که خطوط جریان با سرعت کم‌تر به سمت کناره ایجاد گرداب می‌چرخند، کناره فرسایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بالاترین لایه به دلیل دوری از بستر کانال دارای بالاترین سرعت حدود ۰/۲۱ متر بر ثانیه بوده و پایین‌ترین لایه نیز به دلیل زبری زیاد بستر سرعت کم‌تر دارد. در هر دو شکل نیز در وسط کانال با توجه به دوری و فاصله از مرزهای کناری سرعت جریان بیشتری وجود دارد. هم‌چنین بردارهای سرعت در طول کانال به دلیل غیردائمی بودن جریان اندازه‌های متفاوتی دارند.

علاوه بر این، مشاهده شد که عمق متوسط کانال پس از عبور سیلاب کاهش یافته و مقطع نهایی تمایل به عریض‌تر و کم‌عمق‌تر شدن نسبت به کانال اولیه دارد. اگرچه بعد از عبور از سیلاب، ابعاد کانال تغییر کرد، اما در سطح مقطع نهایی کانال اصلی نسبت به کانال اولیه تغییرات زیادی مشاهده نشده و فقط محیط خیس شده افزایش یافته است. افزایش محیط خیس شده به دلیل عریض شدن کانال است؛ بنابراین شعاع هیدرولیکی کانال اصلی کاهش یافته و به تبع آن ظرفیت کانال کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب توزیع سرعت در بالاترین و پایین‌ترین لایه جریان غیردائمی در کانال شبیه‌سازی شده B1 ارائه شده است. هم‌چنین کانتورهای سرعت نیز در گام زمانی انتهایی جریان غیردائمی استخراج گردید. ریزش کناره کانال تحت تأثیر سیلاب مربوط به گردابه‌هایی است که در



شکل ۱۶- مقایسه توزیع سرعت در بالاترین لایه جریان غیردائمی و کانتورهای الگوی جریان در مدل B1.

Figure 16. Velocity distribution in the uppermost layer of unsteady flow and contours of the flow pattern in model B1.



شکل ۱۷- توزیع سرعت در لایه نزدیک به بستر کانال در مدل B1.

Figure 17. Velocity distribution in the layer near the channel bed in model B1.

جدول ۶ اختلاف نسبی (DR) میان مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده توسط هر کدام از روش‌های طراحی کانال پایدار ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل MIKE21 ابعاد مقطع پایدار مانند عرض، عمق و غلظت رسوب را در مقایسه با سایر روش‌ها به‌خوبی برآورد می‌نماید.

روش‌های طراحی کانال پایدار و مقایسه نتایج آزمایشگاه با مدل MIKE21: نتایج حاصل از مدل عددی MIKE21 بعد از مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل با مقادیر مشاهداتی و روش‌های طراحی کانال پایدار مانند روش WBP، ون راین و برونلی در حالت جریان دائمی مقایسه می‌گردد تا از صحت نتایج به‌دست‌آمده اطمینان حاصل شود. در

جدول ۶- اختلاف نسبی به‌دست‌آمده توسط MIKE21، ون راین، WBP و برونلی به‌ازای پارامترهای هیدرولیکی پیش‌بینی شده.

Table 6. The relative difference obtained by MIKE21, van Raijn, WBP and Brownlie for the predicted hydraulic parameters.

عمق Depth	غلظت رسوب Sediment concentration	عرض بالا Top Width	عرض پایین Bottom Width	روش طراحی
0.98	0.23	0.96	0.88	MIKE21
1.84	0.28	0.53	0.93	Van Raijn
1.52	0.17	0.65	0.94	WBP
1.66	0.31	0.46	0.96	Brownlie

رسوب تأثیرگذارند، ضروری است پس از تعیین بهترین معادله انتقال رسوب، کالیبراسیون مدل نسبت به این پارامترها موردسنجش قرار گیرد. هدف از این کار بررسی این است که در صورت ایجاد تغییر در هرکدام از این پارامترها، چه تغییراتی در نتایج صورت گرفته و همچنین تمهیدات لازم برای این‌گونه تغییرات پیش‌بینی شود. در این بخش به بررسی کالیبراسیون مدل نسبت به فاکتورهای اساسی حاکم در مسأله پرداخته می‌شود.

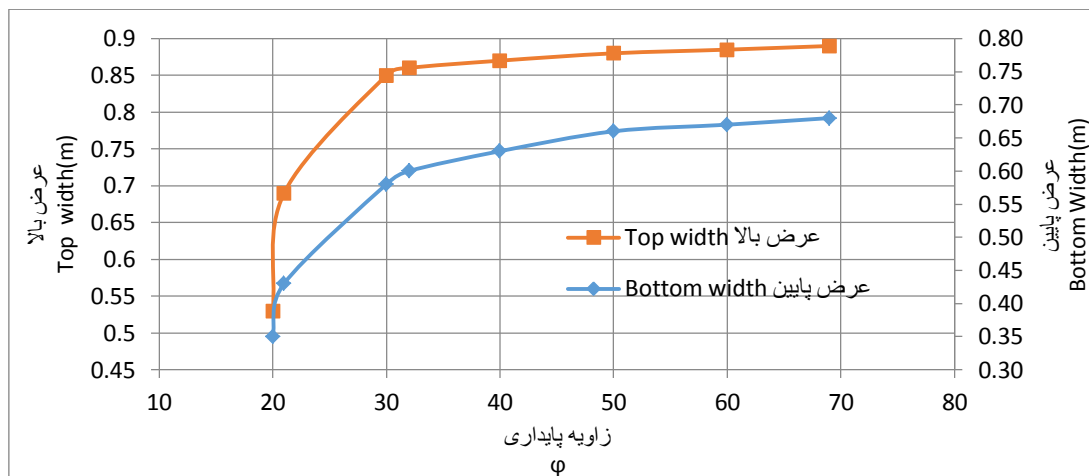
**بررسی کالیبراسیون مدل به زاویه پایداری مصالح بستر:** در این بررسی با فرض ثابت بودن همه پارامترها، زاویه پایداری مصالح از ۲۰ تا حدود ۷۰ درجه به‌منظور رسیدن به زاویه پایدار بهینه، تغییر داده شده است. فرآیند تغییرات ابعاد مقطع کانال مانند عرض پایین و عرض بالا کانال ذوزنقه‌ای در برابر افزایش زاویه پایداری مصالح بستر در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. با افزایش زاویه  $\phi$  تا حدود ۳۵

در حالت جریان غیردائمی نیز از آنجایی که نرم‌افزار جهت پیش‌بینی عمق کانال کالیبره گردیده، در نتیجه نتایج مناسب‌تری برای عمق نسبت به سایر پارامترهای هیدرولیکی با اختلاف نسبی ۱/۰۵ به‌دست‌آمده است. به‌طورکلی در حالت جریان غیردائمی مدل مقدار عرض بالا و پایین کانال را بالاتر پیش‌بینی نموده به‌طوری‌که عرض بالای کانال با اختلاف نسبی ۱/۱۲ نسبت به عرض پایین آن با اختلاف نسبی ۱/۱۵ مناسب‌تر برآورد شده است.

**کالیبراسیون مدل به پارامترهای اثرگذار:** با توجه به این‌که عوامل مؤثر بر پایداری کانال به پارامترهایی وابسته است بنابراین در این بخش به بررسی چند پارامتر تأثیرگذار بر یک کانال پایدار به‌منظور دستیابی به ابعاد مقطع بهینه پرداخته شد. در این پژوهش پس از کالیبره کردن جریان که وابسته به ضریب زبری مانینگ می‌باشد، بخش رسوب را اضافه کرده و از آنجایی که پارامترهای مختلفی در روابط انتقال

این روند تقریباً ثابت می ماند؛ بنابراین تغییرات عرض بالای کانال نسبت به عرض پایین آن در برابر زاویه پایداری بستر با شدت بیش تری همراه است.

درجه عرض پایین کانال رو به افزایش بوده و پس از آن هرچه قدر زاویه پایداری بستر افزایش یابد، بدون تغییر باقی می ماند. هم چنین با افزایش زاویه  $\phi$  تا حدود ۴۰ درجه عرض بالای کانال نیز افزایش یافته و سپس

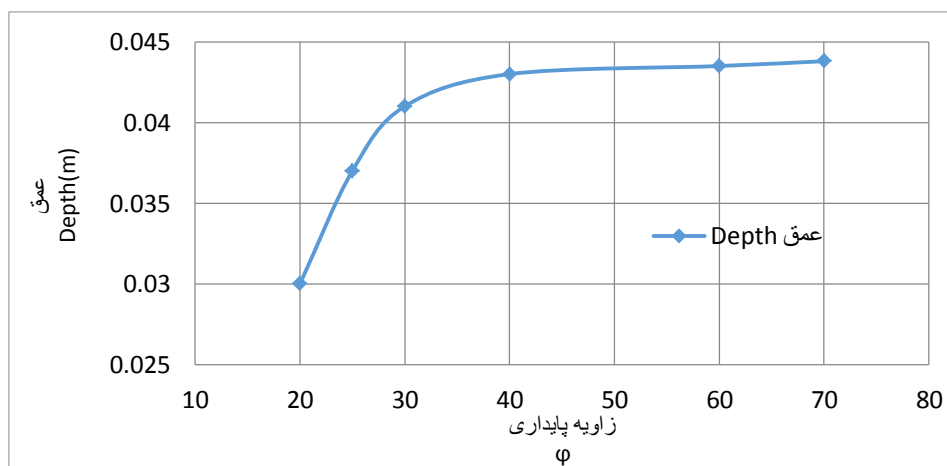


شکل ۱۸- کالیبراسیون مدل نسبت به تغییرات زاویه سکون مصالح بستر.

Figure 18. Calibration of the model according to the changes in the angle of repose of the bed materials.

سپس تقریباً ثابت می شود.

در شکل ۱۹ تا زاویه ۳۰ درجه عمق در برابر افزایش زاویه پایداری مصالح بستر افزایش یافته و



شکل ۱۹- کالیبراسیون عمق مدل نسبت به تغییرات زاویه سکون مصالح بستر.

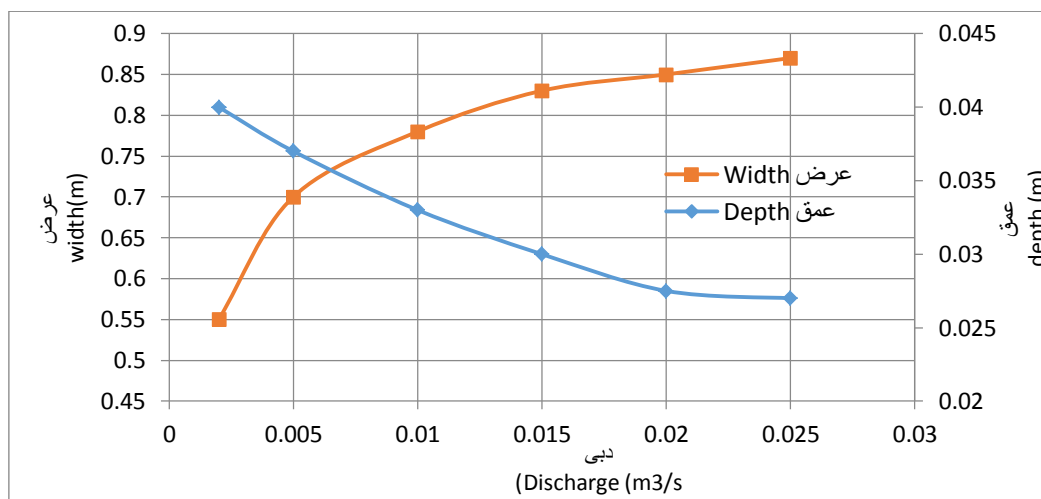
Figure 19. Calibration of the depth model according to the changes in the angle of repose bed.

کاهش عمق و عریض شدن کانال را در پی دارد که این تغییرات به طور هم زمان تا رسیدن کانال به شرایط پایداری خود به صورت هم زمان انجام می شود.

بررسی کالیبراسیون مدل به میزان دبی جریان: افزایش دبی باعث شسته شدن بیشتر کناره های کانال و انتقال رسوبات آن به کف کانال شده و به تبع آن

بیش‌تری تغییر یافته و سپس این تغییرات تقریباً ثابت می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۲۰ نمایش داده شده با افزایش دبی تا حدود ۱۵ لیتر بر ثانیه عمق و عرض با شدت

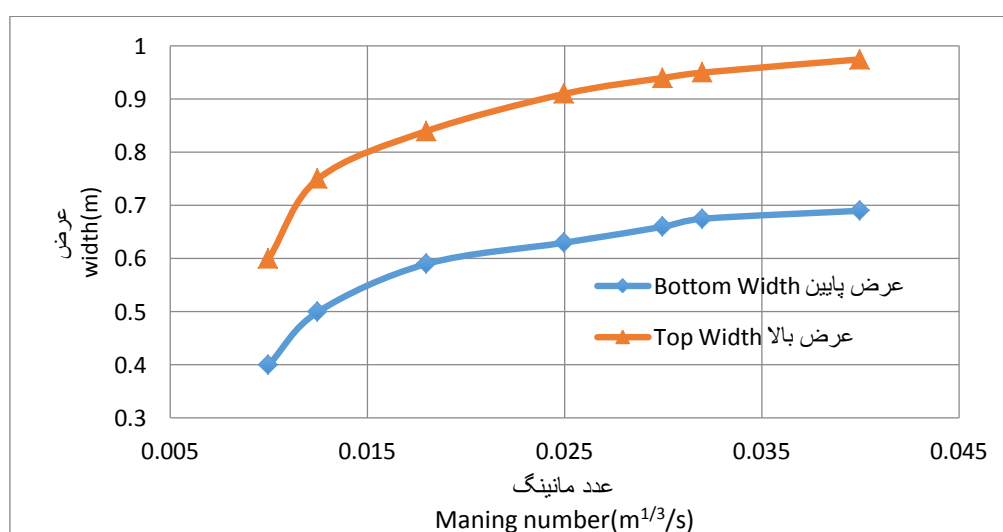


شکل ۲۰- کالیبراسیون مدل در عرض و عمق نسبت به تغییرات دبی جریان ورودی.

Figure 20. Calibration of the model in width and depth relative to the changes in the discharge of the inlet flow.

قرار داد. همچنین اگر تغییرات نسبی سطح آب زیاد باشد، از ضریب مانینگ باید استفاده نمود. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی از عدد مانینگ ۶۶ استفاده شده است. در شکل ۲۱ بررسی مقادیر عدد مانینگ مختلف مانند ۲۵، ۳۰، ۳۲ و ۴۰ در نهایت باعث انتخاب ضریب مانینگ برابر با ۳۲ جهت حفظ پایداری مدل شد.

بررسی کالیبراسیون مدل به میزان مقاومت بستر: همان‌طور که در قبل به آن اشاره گردید در مدل به دو صورت استفاده از ضریب مانینگ یا ضریب شزی می‌توان مقاومت بستر را در مدول هیدرودینامیک جریان در مدل عددی MIKE21 تعریف کرد که در این نرم‌افزار ضریب مانینگ را باید مقدار عکس آن



شکل ۲۱- کالیبراسیون مدل نسبت به تغییرات مقاومت بستر.

Figure 21. Calibration of the model according to changes in bed resistance.



### نتیجه‌گیری کلی

هنگامی که کانال به صورت مقطع پر است، تغییر قابل توجهی در عرض کانال اصلی توسعه یافته (رژیم) ایجاد نمی‌شود، اما عرض کانال اصلی در جریان‌های سیلابی با افزایش عمق و دبی جریان به سرعت افزایش می‌یابد. در تمامی مدل‌ها، عرض کانال تقریباً طی ۳ ساعت ابتدایی به سرعت افزایش می‌یابد و پس‌از آن به مرحله تعادل نزدیک می‌شود 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 در پاسخ به عبور سیلاب، عمق کانال کاهش و شیب دیواره‌ها (شیب جانبی) افزایش یافت.

در حالت جریان دائمی، عرض، عمق و غلظت رسوب پیش‌بینی شده کانال توسط نرم‌افزار MIKE21 نسبت به برونلی، ون‌راین و WBP بهتر تخمین زده شده است. به طوری که 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 که توسط مدل MIKE21 نسبت به روش برونلی، ون‌راین و WBP برآورد گردیده کم‌تر از مقادیر آزمایشگاهی است که به منظور از پارامتر اختلاف نسبی (DR) استفاده گردید. این نرم‌افزار و روش‌های طراحی کانال پایدار استفاده شده در این تحقیق که حاصل مدل‌سازی عددی کانال آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار است، مقادیر عرض و عمق کانال پایدار را به نسبت مقادیر مشاهداتی بیش‌تر برآورد می‌نماید. به طوری که در حالت جریان دائمی برآورد نتایج عمق و عرض کانال پایدار در مدل MIKE21 در مقایسه با نتایج حاصل از جریان غیردائمی با دقت بیشتری به دست آمده است. در دو حالت جریان دائمی و غیردائمی نرخ تغییرات ابعاد کانال در نرم‌افزار نسبت به مقادیر مشاهداتی در کانال آزمایشگاهی بیش‌تر بود.

بنابراین یک کانال آبرفتی مقطع پر پایدار، هنگامی که در معرض یک سیلاب قرار می‌گیرد، به سمت یک کانال پایدار جدید متمایل می‌گردد که برای تعیین اهمیت زمان پاسخ مورفولوژیکی به کار بیش‌تری نیاز خواهد بود. آنچه مسلم است یک کانال پایدار فقط تحت یک شرایط خاص هیدرولیکی پایدار است؛ بنابراین در هنگام سیلاب، زمانی که جریان عبوری در یک کانال رژیم مقطع پر تغییر نماید، شرایط جدیدی بر آن حاکم خواهد شد. استفاده از رابطه آشفستگی اسماکورینسکی نیز 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 از جمله میر-پیتر و مولر و ون-راین بهتر پیش‌بینی می‌نماید.

### تقدیر و تشکر

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از آقایان دکتر منصور هیدرا و دکتر سیروس ارشادی برای استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مقالات مستخرج از رساله دکتر ایشان تقدیر و تشکر نماییم.

### داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی MIKE21 در این پژوهش از داده‌های آزمایشگاهی رساله دکتر هیدرا (Haidera) با عنوان *The stability of alluvial channels with overbank flow* نویسنده مسئول، در آزمایشگاه هیدرولیک پروفیسور نواک دانشگاه نیوکاسل انگلستان استفاده گردید. این داده‌ها با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

### حمایت مالی

این پژوهش از حمایت معنوی معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول برخوردار بوده است. مطالعه حاضر بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی نویسنده اول (امیر سجاد ملکی) با راهنمایی اساتید پایان‌نامه، دکتر غلامرضا عزیزیان و دکتر سید آرمان هاشمی منفرد می‌باشد.

### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است: نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله، نویسنده دوم: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، نظارت تحقیق، نویسنده سوم: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، مشارکت در طرح و روش تحقیق.

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

### منابع

1. Arab, A., and Esmaili, K. 2021. Effect of Longitudinal and Side Slope of Flood Plain on Sediment Erosion in Compound Channel. *Isfahan, J. of Water and Soil Science*. 25: 1. 243-259. (In Persian)
2. Yang, K., Cao, S., and Knight, D.W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *J. of Hydraulic Engineering*. 133: 2. 148-159.
3. Lindley, E.S. 1919. Regime channels, In: *P. of Punjab Engineering Congress*. Punjab Engineering Society Lahore, India (now Pakistan). pp. 63-74.
4. Razzaghi, M.M., and Hajikandi, H. 2010. Survey particular bankfull and determine regime equation in rivers. *International River Engineering Conference Shahid Chamran University*. pp. 1-9. (In Persian)
5. Dhakal, D., Sharma, N., and Pandey, A. 2021. Review of Flow Simulation Methods in Alluvial River. P 289-306, In: *A. Pandey, S. Mishra, M. Kansal, R. Singh, V.P. Singh (eds), Hydrological Extremes*. Water Science and Technology Library, Springer, Cham. pp. 289-306.
6. Komasi, M., and Davodi, G.R. 2020. 3D Simulation of Water Flow and Sediment in Mehrian River by Mike Numerical Software. *Second National Conference on Advanced Research in Engineering and Applied Science*. by University of Ayatollah Ozma Borujerdi. pp. 1-13. (In Persian)
7. Islam, A., Sarkar, B., Saha, U.D., Islam, M., and Ghosh, S. 2022. Can an annual flood induce changes in channel geomorphology. *Natural Hazards*. 111: 1. 1019-1046.
8. Azizyan, G. 2009. A Laboratory Study of Scour River Structures Subject to Unsteady Flows, PhD Thesis. University of Newcastle Upon Tyne. 257p.
9. Haidera, M. 2002. The stability of alluvial channels with overbank flow, PhD Thesis. University of Newcastle upon Tyne. 275p.
10. Danish Hydraulic Institute. (2014). MIKE21 flow model FM. User Guide. MIKE by DHI. 58p.
11. Ershadi, C., and Valentine, E.M. 2005. An experimental investigation of the channel adjustment process due to the passage of floods, In: *G. Parker and, M.H. Garcia (eds), River Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Illinois, Usa. pp. 295-306.