



Simulation of the relations of the Stage-Discharge, erosion and sedimentation of the Yalfan River in Ekbatan Dam using by FLUENT numerical model

Milad Hosseini Nasab¹, Alireza Ildoromi²

1. Department of environment, faculty of Natural resources and environment, Malayer University, Malayer, Iran.

Email: milad.hosseinyinasab1371@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Iran

Email: a.ildoromi@malayeru.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

27 Nov 2025

Received in revised form:

16 Jan 2026

Accepted:

19 Mar 2026

pp.83-105

Keywords:

Erosion,
Cross Sections,
Model,
Flow Velocity,
Fluent.

ABSTRACT

Today, quasi-two-dimensional numerical models have found widespread application in hydraulics of river flow and sediment. In this study, the Stage-Discharge relations, erosion, and sedimentation in the Yalfan River of the Ekbatan Dam in Hamedan have been simulated using the Fluent model. First, the numerical values of runoff advance for turbulent models in rectangular and trapezoidal sections were estimated with the model and examined and compared with laboratory results at different times. The results showed that in a rectangular cross section, runoff distribution and pressure are distributed almost equally across the channel surface, and the values of the Stage-Discharge do not show much change. In a trapezoidal channel with a closed cross-section, Stage-Discharge measured the discharge and showed that the spread of runoff at a higher velocity and pressure at the bottom of the channel increased erosion at the bottom. In a trapezoidal channel with an open cross-section, the Stage-Discharge values and pressure and diffusion velocity histograms showed that the pressure and diffusion velocity were higher at the sides of the channel and the erosion rate was higher at the sides. The results of the study of Stage-Discharge relations showed that the more closed the trapezoidal channel opening is, the higher the pressure at the bottom and the lower the pressure at the channel wall, and as a result, the greater the erosion rate at the bed. Conversely, the more the trapezoidal opening is opened, the greater the runoff pressure at the sides of the bed, and as a result, the greater the erosion rate. The results showed that due to the change in the relationship between Stage-Discharge, flow velocity and pressure, the rate of erosion and sedimentation changes drastically at different sections. The study of runoff distribution showed that the channel shape has an important effect on creating riverbed instability and causes meandering and shifting of the river course, which should be considered in river engineering works.

Cite this article: Hosseini Nasab, M., Ildoromi, A. (2026). Simulation of the relations of the Stage-Discharge, erosion and sedimentation of the Yalfan River in Ekbatan Dam using by FLUENT numerical model. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(4), 83-105.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.543684.1579](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.543684.1579)

Extended Abstract

Introduction

Currently, using discharge-Eschle curves and measuring discharge in natural rivers is generally difficult and error-prone. Therefore, the use of new models plays an effective role in reducing the time and cost associated with hydrometry (Ahmad et al. 2021). Due to the importance of this phenomenon and because the use of physical models requires a large space, high cost, and long time to conduct experiments, many river engineering problems are investigated with mathematical models (Azizi et al., 2019). For this reason, to better understand these phenomena, numerical and computational fluid dynamics models should be used to simulate flow, which are more accurate than other simulation methods (Ildoromi et al. 2020). Bagheri (2023) evaluated the methods for calculating the discharge-Eschle curve based on bedform resistance relations at the Ablo Nekarud hydrometric station in Mazandaran and showed that the Einstein-Barbarossa method has the lowest absolute error compared to other methods. Mohammadi et al. (2023) showed in estimating the discharge-echel curve in natural rivers with unsteady flow that with a new method based on constant velocity meters, the discharge-echel curve of unsteady flow and depth and discharge hydrographs can be tracked. Kim et al. (2023) evaluated the sedimentation and erosion of riverbanks and channels in the Mekong Delta using the MK-BEHI index and showed that differences in bank stress and riverbank structures cause changes in the erosion rate and riverbank load. Boustani et al. (2023) studied the distribution of bed shear stress using numerical simulation and compared the results of Ansys Fluent and Flow-3D, showing that the numerical results of the Fluent model were closer to the experimental data compared to the Flow 3D model.

Methodology

The Yalfan River is located in the Ekbatan Dam watershed in the northern part of Alvand, 10 kilometers southeast of Hamedan city. In this study, open channel

flow in a one-dimensional stable has been investigated. manner in channels with conventional rectangular and trapezoidal cross-sections in the Yalfan River of Ekbatan Dam, Hamedan, Given that the shape of the sides of the channel cross-section has an important effect on the discharge-Ecshle relationships, and the distribution of runoff in channels with different cross-section shapes and surfaces has an important effect on causing erosion and instability of the riverbed. Therefore, numerical values of runoff advance in rectangular and trapezoidal sections were calculated at different times and compared with experimental results for different turbulence models and percentage of error of each turbulence model was calculated and compared with each other. In this research, the second-order discretization method of the Fluent model was used to separate the load and the effect of rectangular and trapezoidal sections to investigate the propagation of runoff flow in scour and edge erosion, and the Reynolds stress numbers were used to determine the movement threshold and to analyze the movement pattern and settling of sediment particles in different flow tubes in a laboratory glass channel, using Fluent software.

Results and discussion

The results showed that in a rectangular cross section, runoff distribution and pressure are distributed almost equally across the channel surface, and the flow rates do not show significant changes. In a trapezoidal channel with a closed cross-section, discharge - Eschle's measurements showed that the spread of runoff with higher velocity and pressure at the bottom of the channel causes increased erosion at the bottom. The results of the study in a trapezoidal channel with an open cross-section, the values of the discharge - Eschle and the histograms of pressure and diffusion velocity, showed that the pressure and diffusion velocity are higher on the sides of the channel and the erosion rate is higher on the sides. The results of the assessment of the discharge-Ecshle relationships showed that the more closed the trapezoidal channel opening is, the higher the pressure at the

bottom and the lower the pressure at the channel wall, and as a result, the greater the erosion rate at the bed. Conversely, the more the trapezoid opening is opened, the greater the runoff pressure on the sides of the bed and, consequently, the greater the erosion rate. The results showed that due to the change in the relationship between the discharge-Ecshle and the flow velocity and pressure at different sections, the rate of erosion and sedimentation changes drastically. The study of runoff distribution showed that the channel shape has an important effect on creating riverbed instability and causes meandering and shifting of the river course over time, which should be considered in river engineering works.

Conclusion

Comparison of the output results of the Fluent hydraulic model shows that this model has good ability to estimate changes in river cross sections. The results show that changes in the channel sections of the Yalfan River along the longitudinal profile of the river cause changes in bank erosion and bank erosion. So that at the beginning of the flow with a trapezoidal cross-section, due to changes in flow propagation speed and pressure, erosion and foaming are greater than at the sides. While in rectangular sections in the middle and end of the stream, lateral erosion and bed sedimentation are observed, which must be carefully considered in the location and design of appropriate river engineering control and protection structures. The results showed that modeling the runoff propagation phenomenon in the Fluent environment has acceptable accuracy, but generating the geometry file and solution field network in Gambit software for study using topographic maps requires a lot of time. Therefore, it is recommended that other software be used to create geometry and modeling for modeling in large watersheds, and that the Fluent model be used for modeling in small watersheds that require high accuracy.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

شبیه‌سازی روابط دبی اشل، فرسایش و رسوبگذاری رودخانه یلفان سد اکباتان با استفاده از مدل عددی FLUENT

✉ میلاد حسینی نسب^۱، علیرضا ایلدرمی^۲

۱- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: milad.hosseinyinasab1371@gmail.com
۲- نویسنده مسئول، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: a.ildoromi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	امروزه مدل‌های ریاضی شبه دو بعدی کاربرد گسترده‌ای در مباحث هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه‌ها دارند. در این بررسی روابط دبی-اشل، فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه یلفان سد اکباتان همدان با استفاده از مدل فلوئنت شبیه‌سازی شده است. ابتدا مقادیر عددی پیشروی رواناب برای مدل‌های تلاطمی در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای با مدل برآورد و در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی بررسی و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در مقطع مستطیلی تغییرات سرعت در دیواره‌ها ۵ و در سطح مقطع به ۲۰ متر در ثانیه می‌رسد. همچنین به دلیل افزایش میزان فشار در کف و کاهش فشار در گوشه کناری مقطع و ایجاد جریان میکروگردابه‌ای در قسمت میانی مقطع عرضی رودخانه، حمل رسوبات در قسمت میانی و رسوبگذاری در قسمت کناری رخ می‌دهد که موجب تغییر شکل مورفولوژی رودخانه از مقطع مستطیلی به دوزنقه‌ای می‌شود. نتایج نشان داد که در مقطع دوزنقه‌ای بسته هر دو فرآیند فرسایش و رسوبگذاری به شدت فعال بوده و به دلیل شکل هندسی نامنظم و حرکت جریان آب به صورت هلالی از کف به سمت سطح و برعکس در مسیر جریان آب، مقدار فشار از کف به سطح مقطع افزایش و در نتیجه جریان به شکل سیلاب سرازیر شود. در مقاطع دوزنقه‌ای باز نتایج نشان داد که به دلیل افزایش سرعت جریان به میزان ۵ برابر سرعت اولیه و تغییرات فشار در وسط و سطح مقطع، جریان متلاطمی با سرعت ۲۴ متر بر ثانیه به شکل میکروگردابه‌ها ایجاد می‌شود که موجب تغییر مسیر و مورفولوژی رودخانه به سهمی، شریانی و حتی پیچان رود می‌شود. نتایج نشان داد که تغییر رابطه دبی اشل در اثر تغییر سرعت جریان و فشار در مقاطع مختلف، موجب تغییر میزان فرسایش و رسوبگذاری، تغییر مورفولوژی مقاطع، ناپایداری بستر، و جابجایی مسیر رودخانه می‌شود، که در کاره‌های مهندسی رودخانه باید مورد توجه قرار گیرد.

استناد: حسینی نسب، میلاد و ایلدرمی، علیرضا (۱۴۰۵). شبیه‌سازی روابط دبی اشل، فرسایش و رسوبگذاری رودخانه یلفان سد اکباتان با استفاده از مدل عددی FLUENT. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱۴ (۴)، ۸۳-۱۰۵.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.543684.1579

مقدمه

در دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی تغییرات مورفولوژیک رودخانه‌ها صورت گرفته و هدف اصلی این پژوهش‌ها شناخت سیستم رودخانه از نظر شکل و فرم کلی و نیز روند و مکانیزم تغییرات آن می‌باشد (خانجانی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و عدم کاربرد مدل‌های سه بعدی در سطح گسترده، امکان بررسی جامع مسئله رسوبگذاری و فرسایش تحت تأثیر هیدرولیک و هندسه کانال اصلی تاکنون میسر نشده است (ایلدرمی و همکاران، ۱۴۰۰). از طرف دیگر تعیین رابطه دقیق جهت برآورد دبی و رسوب همراه با شناخت مکانیسم‌های کنترل کننده فرایند انتقال رسوب در جریان سیالات کار مشکلی است (ایلدرمی و همکاران ۱۳۹۵). در حال حاضر استفاده از منحنی‌های دبی-اشل و اندازه‌گیری دبی در رودخانه‌های طبیعی عموماً دشوار و همراه با خطا است. لذا استفاده از مدل‌های جدید نقش مؤثری در کاهش زمان و هزینه مرتبط با هیدرومتری دارد (احمد^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به اهمیت این پدیده و به دلیل اینکه استفاده از مدل‌های فیزیکی نیازمند فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام آزمایشات می‌باشند، بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه با مدل‌های ریاضی بررسی می‌شوند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۸). در این رابطه کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل ریاضی FLUENT جهت بررسی هیدرولیک جریان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. چرا که می‌تواند بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه همبستگی معنی‌داری برقرار نماید (بایزیدی، ۱۳۹۶). مدل هیدرولیکی FLUENT مبتنی بر اصول اساسی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مانند بقای جرم، ممنتوم و انرژی می‌باشد و از معادلات ناویر-استوکس، معادلات تنش رینولدز در تحلیل جریان استفاده می‌کند (ژائو^۲ و همکاران، ۲۰۰۴). بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمایز اصلی مقاطع مرکب با مقاطع ساده در کانال‌ها به دلیل اختلاف سرعت می‌باشد که موجب تغییرات در توزیع تنش برشی بستر کانال می‌گردد (بوستانی و همکاران، ۱۴۰۲). به همین دلیل برای شناخت بهتر این پدیده‌ها از مدل‌های عددی و دینامیک سیالات جهت شبیه‌سازی جریان باید استفاده می‌شود که نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی دارای دقت بالا هستند (ایلدرمی و همکاران، ۱۴۰۰). بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد که تحلیل ریاضی و عددی شبیه‌سازی تغییر مورفولوژی رودخانه در اثر تغییر الگوی فرسایش و رسوبگذاری، به دلیل کاربرد دقیق و مطابق با واقعیت در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

صالحی و همکاران (۱۳۹۷) به مدل‌سازی عددی امواج ناشی از شکست سد سنگی- ملاتی در حوضه نویشان آذربایجان غربی با استفاده از مدل Fluent و روش VOF نشان دادند که مدل Fluent از دقت بالایی در مدل‌سازی جریان سه بعدی برخوردار است. مظفری و همکاران (۱۴۰۱) در مدل‌سازی تغییرات فرسایش و رسوب رودخانه سجاسرود نشان دادند که فرایند رسوبگذاری در بستر رودخانه بر فرایند فرسایش غلبه دارد. جباری و همکاران (۱۴۰۱) در شبیه‌سازی تغییرات بستری پیوندگاه رودخانه‌های گاماسیاب و قره سو در سیلاب ۱۳۹۸ با استفاده از مدل SRH-2D نشان دادند که فرسایش بر مرکز و متمایل به بخش بیرونی مئاندر رودخانه اصلی متمرکز شده است. گودرزی و همکاران (۱۴۰۱) در مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و فرسایش کنار رودخانه‌ای در شرایط سیلابی حوضه آبریز کشکان، نشان دادند که حجم رسوبات معلق انتقالی نسبت به متوسط در رودخانه کشکان بیشتر است. ایلدرمی (۱۴۰۱) در شبیه‌سازی الگوریتم الگوی حرکت ذرات رسوبی رودخانه سد اکباتان با استفاده از مدل عددی فلوئنت، نشان داد که مدل در شبیه‌سازی حرکت ذرات رسوبی با قطرهای مختلف از توانایی و دقت بسیار خوبی برخوردار است. محمدزاده وطن‌چی و همکاران (۱۴۰۱) در تحلیل عدم قطعیت منحنی‌های دبی-اشل در رودخانه‌ها، نشان دادند که هر چه دقت تعیین ضریب زبری به عنوان پارامتر ورودی بیشتر باشد، عدم قطعیت در تخمین دبی کاهش خواهد یافت. جمالی و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی استخراج رابطه دبی-اشل مقاطع مرکب چندسیلاب دشتی با مدل‌های یک بعدی و دوبعدی نشان دادند که این مدل‌ها قابلیت

1 . Ahmad

2 . Zhao

مناسبی برای تخمین دبی کل و نیز دبی‌های جزئی در مقاطع مرکب چندسیلاب دشتی دارند. علی نوری و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی میزان تعمیم پذیری نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی به رودخانه‌های طبیعی برای تخمین منحنی دبی - اشل نشان دادند که ضریب تغییرات در کانال‌های مستقیم و بدون زبری در روش SC-SIV از تمام روش‌های دیگر کمتر است. باقری (۱۴۰۲) در ارزیابی روش‌های محاسبه منحنی دبی-اشل بر اساس روابط مقاومت فرم بستر در ایستگاه هیدرومتری آبلو نکارود مازندران، نشان دادند که روش انیشتین - بارباروسا دارای کمترین مقدار خطای مطلق نسبت به سایر روش‌ها است. محمدی و همکاران (۱۴۰۲) در تخمین منحنی دبی-اشل در رودخانه‌های طبیعی با جریان غیردائمی نشان دادند که با روش جدید و مبتنی بر کنتورهای هم سرعت، در تخمین منحنی دبی-اشل و هیدروگراف‌های عمق و دبی در رودخانه‌های طبیعی با جریان غیردائمی میتوان منحنی دبی-اشل جریان ناپایدار و همچنین هیدروگراف‌های عمق و دبی را برای رودخانه‌های طبیعی روندیابی نمود. نبی زاده ولوکلای و همکاران (۱۴۰۲) در واسنجی هیدرولیک جریان و رسوب با مدل ریاضی شبه دوبعدی شیونو و نایت در رودخانه زارم رود نشان دادند که رابطه رسوبی اینشتین در هر دو حالت مدل‌سازی یک بعدی و شبه دوبعدی دارای بهترین دقت است. بوستانی و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی توزیع تنش برشی بستر با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه نتایج Ansys Fluent و Flow-3D نشان دادند که نتایج عددی مدل Fluent در مقایسه با مدل Flow 3D به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک تر بودند. رستمی و همکاران (۱۴۰۳) در مدل سه بعدی توسعه داده شده برای استخراج رابطه دبی-اشل در مقاطع مرکب چند سیلاب دشتی مستقیم، نشان دادند که مقایسه کانتورهای هم سرعت محاسباتی و مشاهداتی نشان داد که در هر دو حالت، حداکثر سرعت جریان در میانه مقطع اصلی و متمایل به چداره سمت راست آن، و نزدیک به سطح آب رخ داده است.

لای^۱ و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب با مدل سه بعدی برای کانال‌های رو باز سطح آزاد با استفاده از معادلات حاکم بر جریان و رسوب معلق، نشان دادند که تطابق خوبی بین جریان و رسوب با داده‌های تجربی ارائه داده است. احمدی و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی و تخمین منحنی‌های دبی جریان در کانال‌های روباز با استفاده از کانتورهای هم سرعت با استفاده از روشی نوین مبتنی بر تکنیک ایزوول و مقاطع هندسی مختلف نشان دادند که میانگین مقدار خطا در محدوده ۷.۲٪ است. و می‌توان آن را برای انواع مقاطع هیدرولیکی، اعمال کرد. کیم^۲ و همکاران (۲۰۲۳) در ارزیابی رسوب گذاری و فرسایش کناره‌های رودخانه‌ها و کانال‌ها در دلتای مکونگ با استفاده از شاخص MK-BEHI نشان دادند که تفاوت در تنش کناره ای، سازه‌های کناره رودخانه، باعث تغییر نرخ فرسایش و بار کناره رودخانه می شود. احمد و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی رفتار رودخانه سند و تغییر مسیر در اثر رخداد دسیلاب و فرسایش کناره ای نشان دادند که مسیر رودخانه سند در اثر سیلاب همچنان به سمت شرق تغییر می کند و مناطق اطراف را به طور متوالی فرسایش می دهد. قوش^۳ و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی عوامل مؤثر فرسایش کناره‌ای رودخانه گنگ با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک نشان دادند که مدل ۲۵۴ مکان را به عنوان فرسایش کناره ای کم (LBE) و ۱۱۱ مکان را به عنوان فرسایش کناره زیاد (HBE) با دقت ۸۴/۴٪ و ۶۷/۳٪ پیش بینی کرده است. هانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۴) در شبیه سازی فرسایش کناره رودخانه با ترکیب الگوریتم نقشه‌های هندسه کانال (SOM) و شبکه داده‌های کوتاه مدت و بلند مدت (LSTM) نشان دادند که جابجایی عمودی و افقی بستر، کناره رودخانه و عرض کلنال بیشتر تحت تاثیر شرایط

1. Lay

2. kim

3. Ghosh

4. Hang

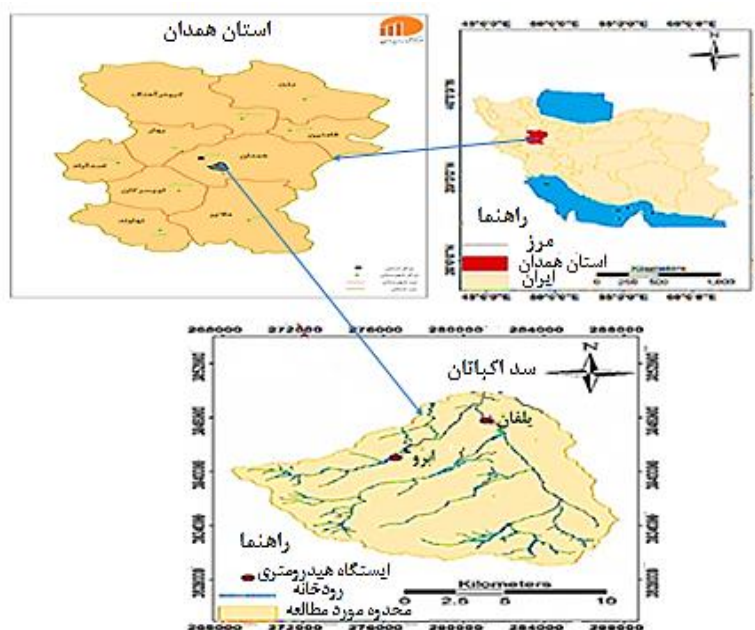
هیدرولوژیکی، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و خواص خاک می‌شود. سالائو^۱ و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی پیامدهای بالقوه سیل بر تغییرات عرضی کانال و الگوهای شریانی در رودخانه کادونا نیجریه نشان دادند که تغییرات قابل توجه در مورفولوژی و افزایش عرض کانال و تغییر به سمت الگوهای شریانی تحت تاثیر جنگل‌زدایی، شهرنشینی و تغییرات کاربری اراضی رخ داده است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که امروزه استفاده از مدل‌های مهندسی رودخانه در تحلیل و شبیه‌سازی رواناب، فرسایش و رسوبگذاری، طغیان و انتقال رسوب کاربرد فراوانی در هیدرولیک جریان دارد و مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه استفاده از مدل‌های سه‌بعدی و قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی سیالات و مطالعه رودخانه بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در حال حاضر استفاده از منحنی‌های دبی-اشل و اندازه‌گیری دبی در رودخانه‌های طبیعی عموماً دشوار و همراه با خطا است. لذا استفاده از مدل‌های جدید نقش مؤثری در کاهش زمان و هزینه مرتبط با هیدرومتری دارد. با توجه به اهمیت این پدیده و به دلیل اینکه استفاده از مدل‌های فیزیکی نیازمند فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام آزمایشات می‌باشند، بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه با مدل‌های ریاضی بررسی می‌شوند. در این رابطه کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل ریاضی FLUENT جهت بررسی هیدرولیک جریان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. چرا که می‌تواند بین متغیرهای هندسی و مورفولوژیکی مقاطع عرضی رودخانه و هیدرولیک رودخانه همبستگی معنی‌داری برقرار نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمایز اصلی مقاطع به دلیل اختلاف سرعت می‌باشد که موجب تغییرات در توزیع تنش برشی بستر کانال می‌گردد. به همین دلیل برای شناخت بهتر این پدیده‌ها از مدل‌های عددی و دینامیک سیالات جهت شبیه‌سازی جریان باید استفاده شود که نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی دارای دقت بالا هستند.

هدف از این بررسی شبیه‌سازی تاثیر روابط دبی-اشل، فرسایش و رسوبگذاری بر اساس تغییر سرعت انتشار و فشار آب در مقاطع رودخانه یلفان سد اکباتان همدان با استفاده از تحلیل عددی مدل فلوئنت می‌باشد. با بررسی تاثیر شکل مقطع رودخانه در روابط دبی-اشل بر میزان فرسایش، رسوبگذاری و کف‌کنی بسترو کناره‌های مقاطع رودخانه یلفان، می‌توان ضمن افزایش کارایی منحنی دبی-اشل در مکانیابی دقیق فرسایش و رسوبگذاری در مقطع عرضی و نحوه تغییر مورفولوژی رودخانه، شدت ناپایداری بستر و کناره‌ها را بررسی و از نتایج آن در طراحی سازه‌ها و در مکان‌یابی آن‌ها دقت بیشتری اعمال نمود.

مواد و روش‌ها

رودخانه یلفان در حوضه آبخیز سد اکباتان با وسعتی معادل ۲۲۱۵۵ هکتار در بخش شمالی الوند و در فاصله ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر همدان و بین ۳۴'، ۳۴° و ۴۵'، ۳۴° عرض شمالی و ۲۸' ۴۸° و ۴۲'، ۴۸° طول شرقی واقع شده و از زیر حوضه‌های رودخانه قره چای همدان می‌باشد (شکل ۱). دبی متوسط رودخانه یلفان ۵/۲ متر مکعب در ثانیه در سال و متوسط بارندگی سالیانه حوضه ۳۱۲/۹ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد است. از نظر سنگ شناسی دارای سنگ‌های نفوذی و دگرگونی از نوع گرانیت، شیسست، هورنفلس و به شکل محدود دارای تشکیلات آهکی می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این بررسی، جریان به شکل یک‌بعدی پایدار در مقاطع متداول مستطیلی و دوزنقه‌ای در رودخانه یلفان سد اکباتان همدان مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه شکل کناره‌های مقطع تاثیر مهمی در روابط دبی - اشل دارد و با توجه به اینکه انتشار رواناب در مقاطع مختلف تاثیر مهمی در ایجاد فرسایش و رسوبگذاری بستر رودخانه دارد، لذا مقادیر عددی پیشروی رواناب در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل در مسیر رودخانه یلفان سد اکباتان بر اساس بازدیدهای میدانی و داده‌های نقشه‌برداری مقاطع موجود مربوط به سال ۱۴۰۰ در زمان‌های مختلف محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی به ازای مدل‌های مختلف تلاطمی بررسی و درصد خطای تک‌تک مدل‌های تلاطمی بر آورد و با یکدیگر مقایسه گردید. در این تحقیق از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم مدل فلونت جهت تفکیک بار و با بررسی تاثیر مقاطع مستطیلی و دوزنقه ای جهت ارزیابی نحوه انتشار جریان رواناب و تاثیر آن در کف کنی و فرسایش کناره‌ای، از اعداد تنش رینولدز به منظور تعیین آستانه حرکت و جهت تحلیل الگوی حرکتی و ته نشینی ذرات رسوبی در تیوب‌های مختلف جریان در مقطع شیشه‌ای آزمایشگاهی، از نرم‌افزارهای فلونت استفاده شده است.

در تحقیق حاضر از نتایج مدل شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در مقاطع عرضی دوزنقه‌ای و مستطیلی شکل (به عرض ۶ تا ۱۳ متر) برای دبی متوسط سالیانه ۵ متر مکعب در ثانیه و سرعت ۵ متر بر ثانیه رودخانه یلفان سد اکباتان همدان پرداخته شده و جهت ارزیابی دقت مدل فلونت با ضریب تعیین و متوسط خطای مطلق، اقدام به پیش‌بینی رسوب گذاری و فرسایش و حداکثر عمق رسوبگذاری و یا حداکثر عمق فرسایش در مقاطع عرضی با ارزیابی سرعت - فشار شده است. همچنین الگوهای فرسایش و انتقال رسوب در دو مقطع عرضی دوزنقه ای و مستطیلی شکل رودخانه با استفاده از روش حجم‌های محدود، که یک روش تفکیک‌سازی کارا در حل معادلات حاکم بر جریان می‌باشد، پرداخته شده است. جفت کردن معادلات حرکت جریان یعنی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در دو جهت و معادله پیوستگی رسوب به صورت کامل و همزمان انجام و فرض شده که جریان دو بعدی بوده و انتقال رسوب فقط به وسیله بار کف صورت می‌گیرد. برای این منظور از معادله پیوستگی رسوب در مدل فلونت استفاده و بر اساس تغییر اعداد رینولدز در دبی ۵ متر مکعب بر ثانیه، تغییر مقاطع عرضی و مورفولوژیکی رودخانه، از مقطع دوزنقه‌ای به مستطیلی شکل تحت تاثیر فرایند فرسایش و

رسوبگذاری در ساحل چپ و راست رودخانه، شبیه‌سازی شده است. به منظور شبیه‌سازی تأثیر تغییر شکل هندسی مقاطع عرضی رودخانه بر فرآیندهای انتقال جریان و رسوب، داده‌های مقاطع جهت شبیه‌سازی به مدل فلوئنت وارد و سپس با استفاده از نرم‌افزار VOF و گمبیت اقدام به شبیه‌سازی تغییر هندسه جریان شده و در نهایت به شبیه‌سازی الگوی رسوبگذاری و توزیع عرضی آن در مقاطع تغییر یافته رودخانه و تشکیل میکروگردابه‌ها و پشته‌های رسوبی در بستر رودخانه پرداخته شده است.

معرفی مدل fluent

نرم‌افزار فلوئنت از ۳ قسمت اصلی تشکیل شده است. الف) fluent/standard یک حلگر چند منظوره که مبتنی بر انتگرال‌گیری غیرصریح می‌باشد که از آن در جهت حل مسال استاتیکی استفاده می‌شود ب) fluent/Explicit این حلگر هدفی خاص را دنبال می‌کند و حل معادلات غیرخطی با بر همکنش‌های پیچیده را بر عهده دارد. ج) fluent/CFD این حلگر می‌تواند تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته (مثل شبیه‌سازی جریان‌های آب و رسوب) را انجام دهد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، و حل معادلات ناویر-استوکس برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در حالت دو بعدی و پارامترهای فیزیکی و عددی مؤثر بر این پدیده پرداخته شده است.

معادلات کامل ناویر استوکس

معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی سیالات از جمله فرسایش و رسوبگذاری در اصل همان معادلات ناویر استوکس هستند که بر اساس قانون بقای ماده (معادله پیوستگی) و مومنوم (قانون دوم نیوتن) با متغیرهای شناخته شده شامل تراز سطح آب از سطح مبنای فرضی و اجزای سرعت، پایه‌گذاری می‌شوند. این معادلات برای حالت سه بعدی و برای سیال تراکم ناپذیر شامل معادله پیوستگی و معادله مومنوم به صورت زیر تعریف می‌شوند.

بقای جرم (معادله پیوستگی)

رابطه (۱)

بقای مومنوم (معادله ناویر-استوکس)

رابطه (۲)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \nu \nabla^2 u_{x_i}$$

u_i مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت x_i ، ν لزجت مولکولی، ρ چگالی سیال، g_i مؤلفه شتاب ثقل در جهت i ، p ترم فشار در هر نقطه از سیال می‌باشند.

مدل‌سازی توسط نرم‌افزار فلوئنت

در نرم‌افزار هیدرولیکی فلوئنت از روش حجم محدود به منظور حل معادلات دینامیکی جریان سیالات و از معادلات ناویر-استوکس در تحلیل جریان و در صورتی که جریان آشفته باشد از معادلات تنش رینولدز در حل معادله ناویر-استوکس استفاده می‌شود. علاوه بر این بررسی در قسمت پیش پردازنده از نرم‌افزار گمبیت برای تولید شکل و فرم هندسی مقطع آزمایشگاهی استفاده شده است.

مدل تنش رینولدز (Reynolds Stress Model) مدل ۷ معادله‌ای

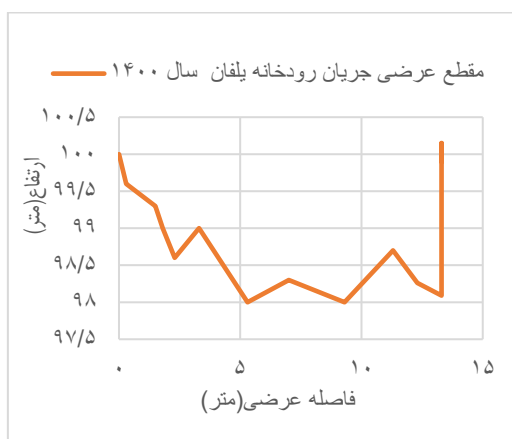
مدل RSM شش معادله انتقال برای شش مؤلفه تنش رینولدز و یک معادله انتقال برای نرخ استهلاک انرژی جنبشی را حل می‌کند. در این بررسی از مدل‌های مختلف تلاطمی $k-\epsilon$ standard، $k-\epsilon$ RNG، $k-\epsilon$ Realizable، $k-\epsilon$ RSM و ω - k برای شبیه‌سازی استفاده شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته و بهترین مدل انتخاب و از طرح‌های مختلف پیشرو مرتبه اول، پیشرو مرتبه دوم، به منظور انفصال جملات جابجایی معادلات استفاده و بهترین گزینه برای سایر مراحل انتخاب و بکار گرفته شده است. در حل دو بعدی میدان حل به صورت دو بعدی و در جهات طولی (X) و قائم (Z)، پارامترهای مختلف هیدرولیکی در دو راستای X و Z در نظر گرفته شده و محاسبه شده‌اند. برای بررسی اثر ابعاد شبکه بر مدل‌سازی جریان و رسوب و تحلیل حساسیت شبیه‌سازی نسبت به ابعاد شبکه محاسباتی، پنج اندازه شبکه با ابعاد ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳ سانتی‌متری در نظر گرفته شده که شبکه با ابعاد ۱ سانتی‌متری بهترین نتایج را داشته است.

تنظیم شرایط مرزی در مدل

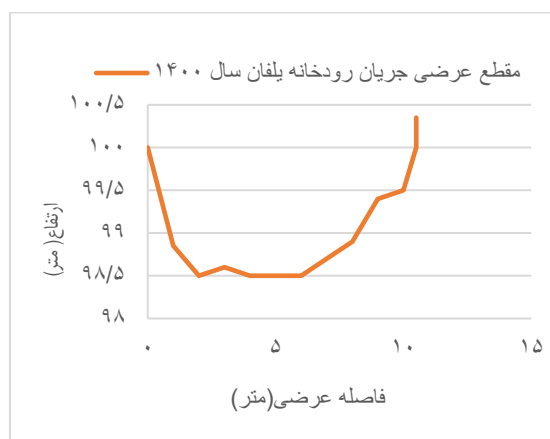
در این بررسی جهت شبیه‌سازی جریان و رسوب بستر و شرط مرزی دیوارها از روش تابع استاندارد دیواره استفاده و دیوارها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در پژوهش پیش رو برای اعمال اثر زبری مربوط به دیواره‌های فلوم از ضریب زبری شیشه که معادل ۰/۰۰۹ می‌باشد، استفاده و ارتفاع زبری صاف، در نظر گرفته شده است.

داده‌های مورد نیاز

در این بررسی بر اساس خط مرکزی جریان، خطوط کناره‌ها و تغییر مقاطع عرضی همراه با بازدیدهای میدانی و بر اساس داده‌های مشاهداتی در مسیر اصلی رودخانه، بازه‌ای به طول ۱۴ کیلومتر از سرشاخه‌های رودخانه یلفان سداکباتان همدان از ارتفاعات پایین دست کوهستان الوند تا نزدیک به ایستگاه یلفان در نزدیکی مخزن سد اکباتان انتخاب شد. سپس با در نظر گرفتن خصوصیات یکسان از لحاظ هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به ویژه تراز سطح آب، عمق، شیب و زبری مسیر و با لحاظ نمودن تغییر پهنای بستر و با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ در محیط GIS-ARC و ARC- Hydro و داده‌های هندسی موجود در امور آب استان همدان پروفیل طولی رودخانه در مسیر ۱۴ کیلومتری ترسیم شد. جهت بررسی مورفولوژی مقاطع عرضی رودخانه یلفان و تاثیر تغییر پهنای مقاطع عرضی تحت تاثیر تغییر سرعت انتشار و فشار هیدرولیکی جریان آب و توزیع عرضی انتقال جریان و رسوبگذاری در ساحل رودخانه و نقش آن‌ها در شریانی و مئاندري شدن رودخانه تعداد ۶ مقطع عرضی ذوزنقه ای شکل طبیعی رودخانه و ۵ مقطع مستطیلی شکل طبیعی از رودخانه یلفان با پیمایش زمینی و نقشه برداری و مترکشی با توجه به تغییر وضعیت شیب (توپوگرافی)، اتصال مسیل‌های مهم به رودخانه اصلی و یکنواختی مصالح، جنس بستر و لیتولوژی و کناره‌ها برداشت شد. (اشکال ۲ و ۳).



شکل ۳. مقطع عرضی رودخانه یلفان در بالادست



شکل ۴. مقطع عرضی رودخانه یلفان در پایین دست

جهت حل سه بعدی جریان در پردازشگر گمبیت و محاسبگر مدل فلوئنت و مدل سازی به صورت سه بعدی و استخراج مختصات X ، Y و Z از نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ استفاده و در حدود ۵۰ هزار نقطه از نقشه‌ی توپوگرافی مورد نظر استخراج و نقشه دقیق و پلان توپوگرافی در محیط اتوکد تهیه و به مدل وارد شد. در مرحله بعد هندسه آبراهه که شامل پروفیل طولی و مقاطع عرضی می‌باشد، در محیط گمبیت تهیه گردید. برای تولید شبکه و ایجاد میدان حل در حالت دو بعدی برای هندسه ساخته شده آبراهه به ازای هر یک متر یک گره تعریف و با توجه به هندسه و فرم خاص آبراهه از المان‌های مثلثی استفاده گردید. با معرفی تعداد گره و مشخص کردن نوع المان هندسه مورد نظر مش بندی انجام و هندسه مدل و شبکه محاسباتی در نرم افزار Gambit ایجاد شد. سپس فایل تولید شده شبکه توسط مدل Fluent که نقش محاسبگر را داراست فرا خوانده شد. در این مدل ابتدا تنظیمات مدل عددی و سپس آنالیز عددی صورت گرفته تا شبیه سازی جریان توسط مدل VOF انجام شود.

مشخصات مدل عددی و معادلات حاکم بر جریان

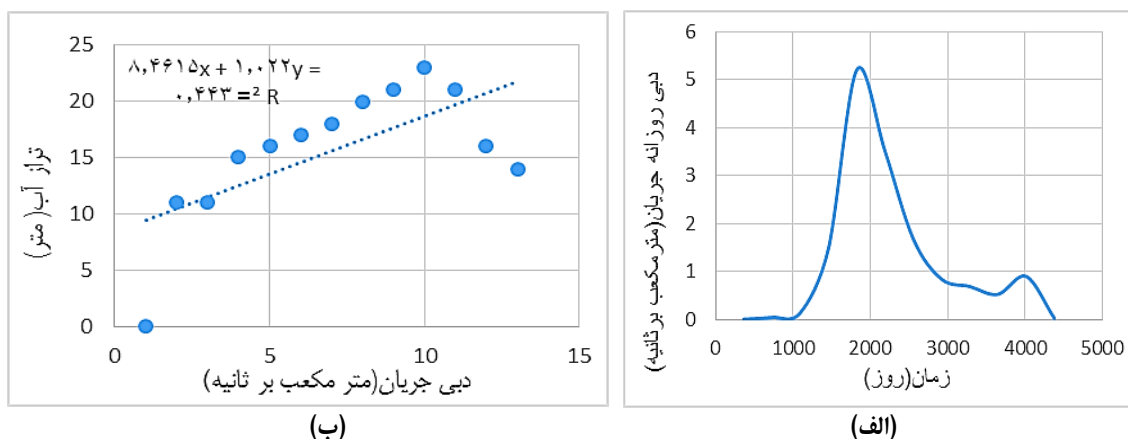
به منظور بررسی نقش تغییرات سرعت برشی (انتشار) و قدرت جریان (فشار جریان) در مسیر مورد مطالعه از یک مقطع به یک مقطع دیگر با مورفولوژی متفاوت پارامترهای عمق، سرعت، فشار و تنش رینولدز مقایسه و ارزیابی شده است. برای کوپلینگ معادلات سرعت-فشار و ایجاد تعادل بین سرعت و فشار در این بررسی از الگوریتم simplec استفاده شده و ضریب under-relaxation مومنتم از ۰/۷ به ۰/۹ تغییر داده شد تا همگرایی مناسب تری ایجاد شود. هدف از این روش بررسی تأثیر اعداد رینولدز برای کوپلینگ معادلات سرعت-فشار و برای از بین بردن تقارن جریان و تحریک شروع جریان، به شکل یک اغتشاش مصنوعی در یک سرعت یکنواخت یعنی ۵ متر بر ثانیه مربوط به رودخانه یلفان است.

مراحل اجرای مدل

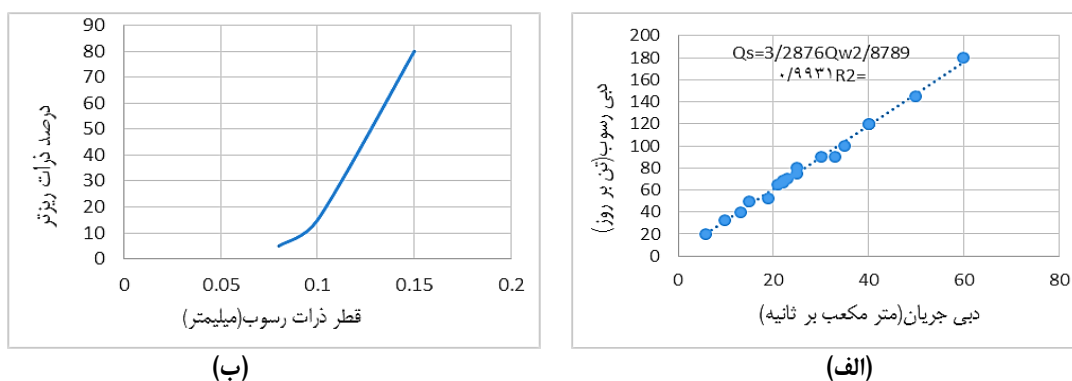
در این تحقیق ابتدا مشخصات هندسی مقاطع و هیدرولیکی میدان حل مشخص و جهت مدلسازی ابتدا شبکه محاسباتی ایجاد و تنظیمات مدل انجام شد. سپس برای مدلسازی عددی با نرم افزار FLUENT 19.3 اطلاعات به مدل وارد و برای ایجاد شبکه محاسباتی از نرم افزار GAMBIT 2.0 استفاده شد. نرم افزار GAMBIT علاوه بر تولید شبکه، هندسه مورد نیاز و ایجاد شبکه مسئله در نرم افزار FLUENT بیشترین تطابق را با نرم افزار FLUENT دارد. برای تولید فرم و هندسه منطقه مورد نظر از نقشه توپوگرافی منطقه به مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان استفاده و با برداشت بیش از ۵۰۰۰۰ نقطه ارتفاعی یعنی بیش از ۱ نقطه ارتفاعی به ازای ۰/۵ متر با استفاده

از تکنیک سونار در مسافت ۱۴ کیلومتری دقت نقشه ۲۰۰۰:۱ به ۵۰۰:۱ افزایش یافت تا تغییر مقاطع عرضی با دقت قابل قبول در محیط اتوکد بررسی شود. جهت حل سه‌بعدی جریان در پردازشگر گمبیت و محاسبه‌گر فلوئنت و همچنین ترسیم سه بعدی آبراهه رودخانه یلفان سد اکباتان همدان، از نقشه توپوگرافی استخراج شده از تکنیک سونار به عنوان داده ورودی در پردازشگر گمبیت استفاده شد. همچنین برای مدلسازی سه‌بعدی نقاط با مختصات X، Y و Z برای ایجاد هندسه مورد نیاز از مجموعه نقاط مختصات‌دار خطوط هم تراز نقشه اتوکدی استفاده شد. در مرحله بعد هندسه مورد نظر در محیط گمبیت فراخوانی شد و سپس با استفاده از نرم افزار گمبیت هندسه آبراهه اصلی رودخانه تهیه گردید. برای تولید شبکه و ایجاد میدان حل در حالت سه‌بعدی برای هندسه ساخته شده آبراهه به ازای هر یک متر به گره تعریف شد و بخاطر هندسه و فرم خاص آبراهه از المان‌های مثلثی استفاده گردید. برای شرط مرزی دیوارها از روش تابع استاندارد دیواره استفاده و دیواره‌ها ثابت در نظر گرفته شد. در حل دوبعدی مسئله رواناب در مقاطع مختلف برای شرایط مرزی حاکم بر میدان حل برای بالادست و پایین دست و بستر جریان از شرط مرزی دیوار و برای سطح بالای جریان از شرط مرزی Pressure Outlet استفاده شده است. در حل سه بعدی مسئله رواناب در مقاطع مختلف برای شرایط مرزی حاکم بر میدان حل، برای بالادست، بستر و کناره‌های جریان از شرط مرزی دیوار و برای پایین دست از شرط مرزی Outflow و برای سطح بالای جریان از شرط مرزی Pressure Outlet استفاده شد. برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از مدل VOF به صورت دوفازی، unsteady یا غیر دائم و در حالت implicit یا ضمنی استفاده شده است. از آنجایی که هدف شبیه‌سازی سطح آزاد جریان می‌باشد در مدل VOF شتاب ثقل برابر $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ در نظر گرفته شد (FLUENT Inc، ۲۰۰۶).

به‌منظور واسنجی هیدرولوژیکی مدل از هیدروگراف روزانه دبی جریان (از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۴۰۰) در ایستگاه یلفان و منحنی دبی - اشل به عنوان اطلاعات هیدرولیکی مورد نیاز مدل استفاده و میانگین داده‌های ورودی در طول دوره آبی ۱۲ ساله مربوط به دبی آب $1/22$ متر مکعب بر ثانیه، مقدار ماکزیمم دبی آب $5/19$ و مقدار مینیمم آن $0/0064$ متر مکعب بر ثانیه و دمای آب به طور میانگین $12/2$ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است (اشکال ۴ و ۵). در بخش اطلاعات رسوبی منحنی سنج رسوب معلق ایستگاه یلفان سد اکباتان به‌عنوان شرط مرزی ورودی به کار گرفته شد (شکل ۶). بعلاوه دبی رسوبات معلق که بصورت تابعی از دبی جریان می‌باشد و با توجه به منحنی سنج رسوب که در شکل (۵) ارائه شده و رابطه $Q_s = 3/2876 Q_w^{0.8789/2}$ ، جهت واسنجی به مدل معرفی گردید. داده‌های مربوط به این بخش شامل رسوب ورودی، دما، درجه‌بندی رسوب و پارامترهای مربوط به انتقال رسوب چسبیده می‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بستر رودخانه یلفان در محدوده مورد مطالعه، بیشتر از جنس رس و سیلت (دانه ریز) می‌باشد و قطر متوسط رسوبات عبوری از ایستگاه‌های هیدرومتری به ترتیب $0/017$ و $0/014$ می‌باشد و بیانگر قرار گرفتن ذرات خاک در گروه ذرات ریز دانه و چسبیده (رس و سیلت) می‌باشد. لذا قطر متوسط رسوبات معلق عبوری به‌طور میانگین برابر $0/015$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل ۷).



شکل ۴: الف) نمودار هیدروگراف دبی جریان روزانه رودخانه یلفان در ایستگاه یلفان (شرط مرزی بالادست)
 شکل ۵: ب) نمودار منحنی دبی - اشل رودخانه در پایین دست بازه مورد مطالعه (شرط مرزی پایین دست)



شکل ۶: الف) نمودار منحنی سنج رسوب معلق ایستگاه یلفان سد اکباتان
 شکل ۷: ب) نمودار منحنی دانه بندی ذرات

واسنجی مدل ریاضی فلوئنت

جهت کالیبراسیون و واسنجی بخش هیدرودینامیک و رسوبی جریان، از اطلاعات هیدرولیکی و هیدرومتری ایستگاه اندازه گیری که در حد فاصل بالادست و پایین دست بازه مورد مطالعه قرار دارد و داده‌های تغییرات رقوم سطح آب در سال ۱۳۸۴ و داده‌های هندسی مقطع عرضی برداشت شده در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۴۰۰ و معادلات انتقال رسوب در یک دوره آماری ۱۲ ساله استفاده شده است. سپس با اجرای مدل، نتایج حاصل، با مقادیر مشاهداتی ایستگاه یلفان در حوضه سد اکباتان مقایسه شد. بدین منظور از اطلاعات پروفیل سطح آب ایستگاه یلفان در سال ۱۴۰۰ استفاده و به‌منظور تایید صحت نتایج از معیارهای ARE ^۱ و $RRMS$ ^۲ استفاده گردید:

$$RRMS = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - Q_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - Q_i)} \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۳)}$$

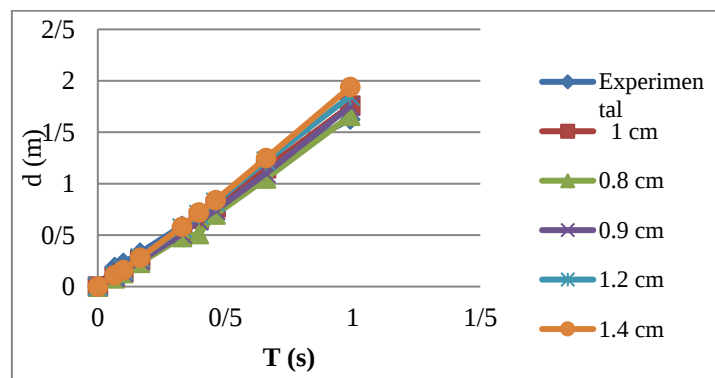
$$ARE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [p_i - Q_i]}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \quad \text{رابطه (۴)}$$

1. Relative Error Absolute
2. Root Relative Mean Square Error

در این روابط n تعداد مقاطع عرضی، p_i عمق خط القعر مقاطع عرضی شبیه‌سازی شده توسط مدل و Q_i عمق خط القعر مقاطع عرضی به دست آمده در عملیات میدانی می‌باشد.

نتایج

در این بررسی ابتدا حل دو بعدی میدان انجام و پارامترهای مختلف هیدرولیکی در دو راستای X و Z در نظر گرفته و محاسبه شدند. بعد از انجام آنالیزهای حساسیت برای مدل‌های تلاطمی مختلف، مدل تلاطمی k -Standard به عنوان مدل برتر انتخاب و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. طرح پیشروی مرتبه اول به عنوان طرح برتر به منظور انفصال جملات جابجایی معادلات استفاده و در ادامه نتایج بدست آمده از حل دوبعدی مسئله رواناب در مقاطع مختلف با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه شده است. در این بررسی شبکه‌های با ابعاد $0.8/0.9$ ، $1/1.2$ ، $1.4/1.6$ سانتی متری برای میدان حل در نظر گرفته شده است. شکل (۸) مقایسه مقادیر عددی پیشروی رواناب در مقطع آزمایشگاهی را در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به ازای هر ۵ شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر ۵ شبکه روند پیشروی رواناب در مقطع آزمایشگاهی همان روند موجود در داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد و دارای تطابق قابل قبولی است.



شکل ۸. مقایسه پیشروی رواناب برای شبکه‌بندی‌های مختلف

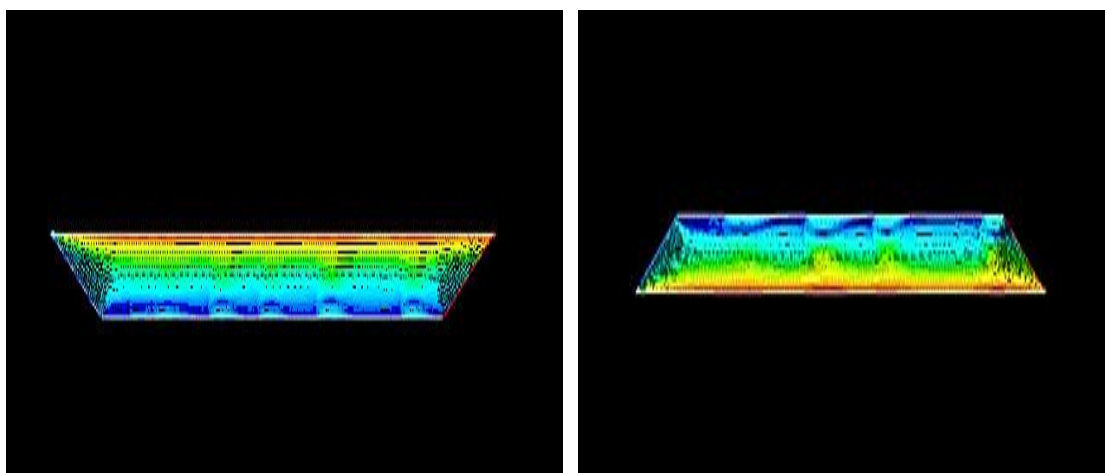
جدول (۱) خطای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف نشان می‌دهد و ملاحظه می‌شود شبکه با ابعاد ۱ سانتی متر کمترین خطا را دارند که در مراحل بعدی مدل‌سازی از این شبکه‌بندی استفاده شده است. نتایج نشان داد که با درشت‌تر شدن شبکه محاسباتی نتایج عددی انطباق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

جدول ۱. درصد خطای موجود بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای اندازه‌های مختلف شبکه

اندازه شبکه (cm)	۰/۸	۰/۹	۱
RMSE	۰/۱۰۳	۰/۰۸۰	۰/۰۷۴

مدلسازی رواناب در مقطع آزمایشگاهی در مقاطع مختلف به صورت دوبعدی

پس از تولید فرم هندسی مدل آزمایشگاهی در پیش پردازنده گمبیت، فایل تولید شده شبکه توسط نرم‌افزار fluent که نقش محاسبگر را داراست خوانده می‌شود. شکل (۹) مدل‌سازی انتشار رواناب در مقطع آزمایشگاهی با مقاطع مختلف (-) مستطیلی و دوزنقه ای) را با استفاده از مدل آشفته‌گی $K-\epsilon$ استاندارد در گام‌های زمانی مختلف در حالت شبیه‌سازی دوبعدی نشان می‌دهد.



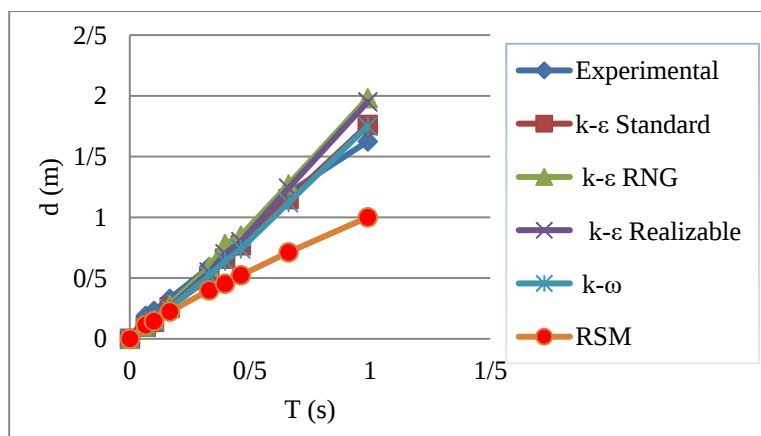
ب) مقطع دوزنقه‌ای

الف) مقطع مسطیلی

شکل ۹. مدلسازی انتشار رواناب در مقطع آزمایشگاهی با مقاطع مختلف (مسطیلی و دوزنقه‌ای) با استفاده از مدل آشفتگی K-ε استاندارد در گام‌های زمانی مختلف

پیشروی رواناب در مقاطع مختلف حاصل از مدل‌های مختلف تلاطمی

جهت بررسی پیشروی رواناب در مقاطع مختلف، پیشرفت پیشروی رواناب برای تمام مدل‌های تلاطمی بر آورد و با پیشرفت موج در حالت آزمایشگاهی مقایسه گردید. شکل (۱۰) مقایسه مقادیر عددی پیشروی رواناب در مقاطع مختلف را در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به ازای مدل‌های تلاطمی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج عددی تمامی مدل‌های تلاطمی مورد استفاده روندی مشابه با نتایج آزمایشگاهی دارند و تطابق قابل قبولی دارند.



شکل ۱۰. مقایسه پیشروی رواناب در در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به ازای مدل‌های مختلف تلاطمی

برآورد درصد خطای مدل‌های تلاطمی و آزمایشگاهی

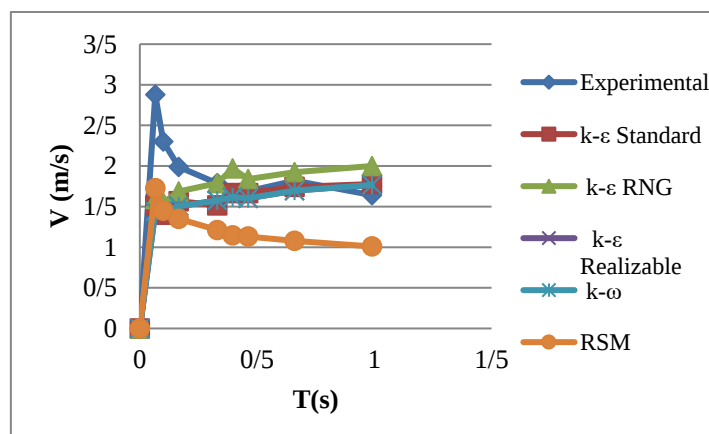
نتایج نشان داد که روش k-ε استاندارد به دلیل اینکه بر پایه جریان کاملاً متلاطم بنا شده و با توجه به نتایج حاصله مدل k-ε استاندارد کمترین خطا را دارا می‌باشد و نتایج نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی دارد، لذا در مراحل بعدی مدلسازی از این مدل استفاده شد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مدل K-ε استاندارد و K-ω نتایج نزدیک به هم دارند و نسبت به مدل‌های K-ε RNG و K-ε Realizable تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارند. در این بررسی مدل RSM بیشترین خطا را نشان داد (جدول ۲).

جدول ۲. درصد خطای موجود بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مدل‌های تلاطمی مختلف

مدل آشفتگی	k-ε استاندارد	RNG	K-ε Realizable	RSM	K-ω
RMSE	۰/۰۷۴	۰/۱۳۵	۰/۱۲۱	۰/۲۹۷	۰/۰۷۵

بررسی سرعت رواناب برای مدل‌های مختلف تلاطمی

سرعت انتشار رواناب حاصل تقسیم پیشروی موج بر زمان می‌باشد که در این بررسی سرعت پیشروی موج برای تک تک مدل‌های تلاطمی محاسبه و با سرعت پیشروی موج در شرایط آزمایشگاهی مقایسه گردید، نتایج نشان داد که در ابتدا سرعت پیشروی رواناب در حالت آزمایشگاهی نسبت به مدل‌های تلاطمی بیشتر است و با تداوم زمان این نسبت کاهش می‌یابد. شکل (۱۱) سرعت پیشروی رواناب برای مدل‌های مختلف آشفتگی و حالت آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

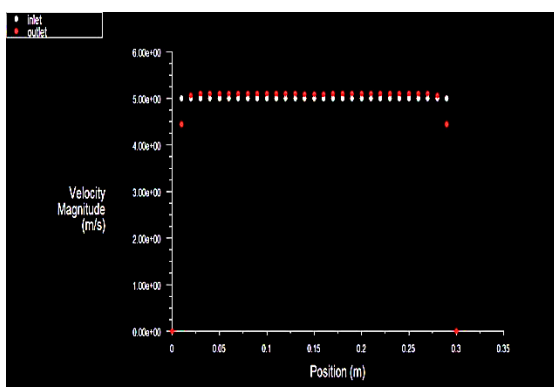


شکل ۱۱. سرعت پیشروی رواناب برای مدل‌های تلاطمی مختلف و شرایط آزمایشگاهی

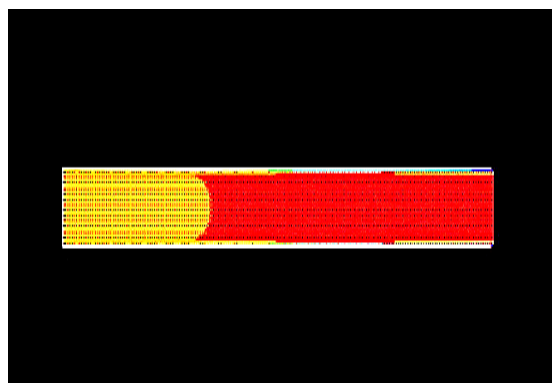
بررسی روابط دبی-اشل در انتشار رواناب در مقاطع مستطیلی

نتایج نشان داد که شکل کناره‌های مقطع تاثیر مهمی در روابط دبی-اشل دارد. همانطور که از شکل (۱۲) استنباط می‌شود انتشار رواناب در مقطع مستطیلی به صورت یکسان در تمام ابعاد مقطع بخش شده لذا اندازه‌گیری روابط دبی اشل در مقطع مستطیلی تغییرات خاصی را نشان نمی‌دهد. بررسی شکل (۱۳) نشان می‌دهد که اندازه‌گیری روابط دبی اشل با مقطع مستطیلی تغییرات خاصی نداشته و در مقاطع با دیواره مستطیلی با جریانی با سرعت یکسان روابط دبی اشل تغییرات زیادی نخواهد داشت و جریان به صورت یکسان در تمام مقطع پخش می‌شود. به عبارت دیگر در مقاطع مستطیلی سرعت انتشار اولیه جریان با ۵ متر مکعب از ابتدای مسیر تا انتها تغییری پیدا نمی‌کند و با توجه به تاثیر سرعت جریان بر دبی و مقدار فرسایش تقریباً مورفولوژی این مقطع در طول زمان با تغییر جزئی تحول کمی پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که مورفولوژی کناره‌های مقطع مستطیلی شکل تاثیر مهمی در روابط دبی-اشل دارد. در بررسی میدانی و ارزیابی مقاطع برداشت شده در سال ۱۴۰۰ از مسیر رودخانه از بالادست به سمت پایین دست رودخانه یلفان سداکباتان مشخص شد که در طول پروفیل طولی رودخانه علی‌رغم تغییر قابل توجه شیب در طول مسیر، تغییر مورفولوژی رودخانه در فواصل چند کیلومتر از ابتدا تا انتهای مسیر مورد مطالعه کمتر رخ داده است. با توجه به اینکه در تمام شبیه‌سازی‌ها، سرعت جریان در مقطع ۵ متر بر ثانیه لحاظ شده و با شرط ثابت و یکسان بودن جریان، علت تغییر مقاطع بر اثر مقدار و نحوه توزیع سرعت انتشار بعلاوه فشار هیدرواستاتیکی جریان می‌باشد. بعلاوه نتایج نشان داد که تغییرات سرعت در دیواره‌های مقطع ثابت و برابر صفر

می‌باشد اما عمده تغییرات سرعت در سطح مقطع مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد که بیشترین میزان سرعت در سطح مقطع به ۲۰ متر در ثانیه می‌رسد که به میزان ۴ برابر سرعت اولیه جریان می‌باشد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت از کف مقطع به سمت بالای مقطع موجب افزایش حمل رسوبات در قسمت میانی و بالای مقطع می‌شود و در قسمت کناری مقطع رسوبگذاری رخ می‌دهد. ضمن اینکه رسوب‌گذاری محدود در کف مقطع باعث بالا آمدن کف مقطع به مرور زمان شده و تداوم این امر موجب تغییر شکل مورفولوژی مقطع از حالت مستطیلی شکل به سمت مقطع دوزنقه‌ای می‌شود.

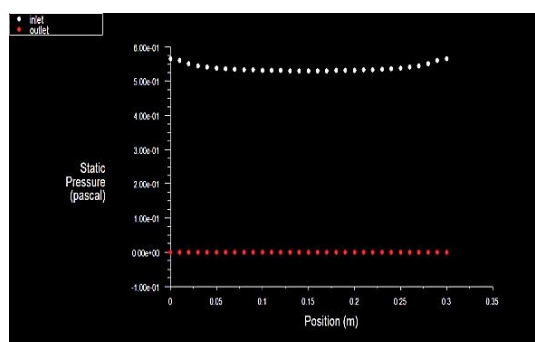
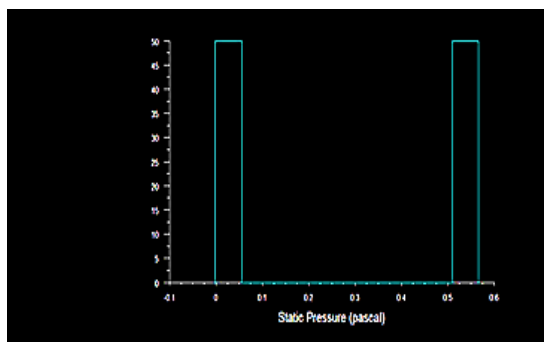


شکل ۱۳. رابطه دبی اشل در مقطع مستطیلی

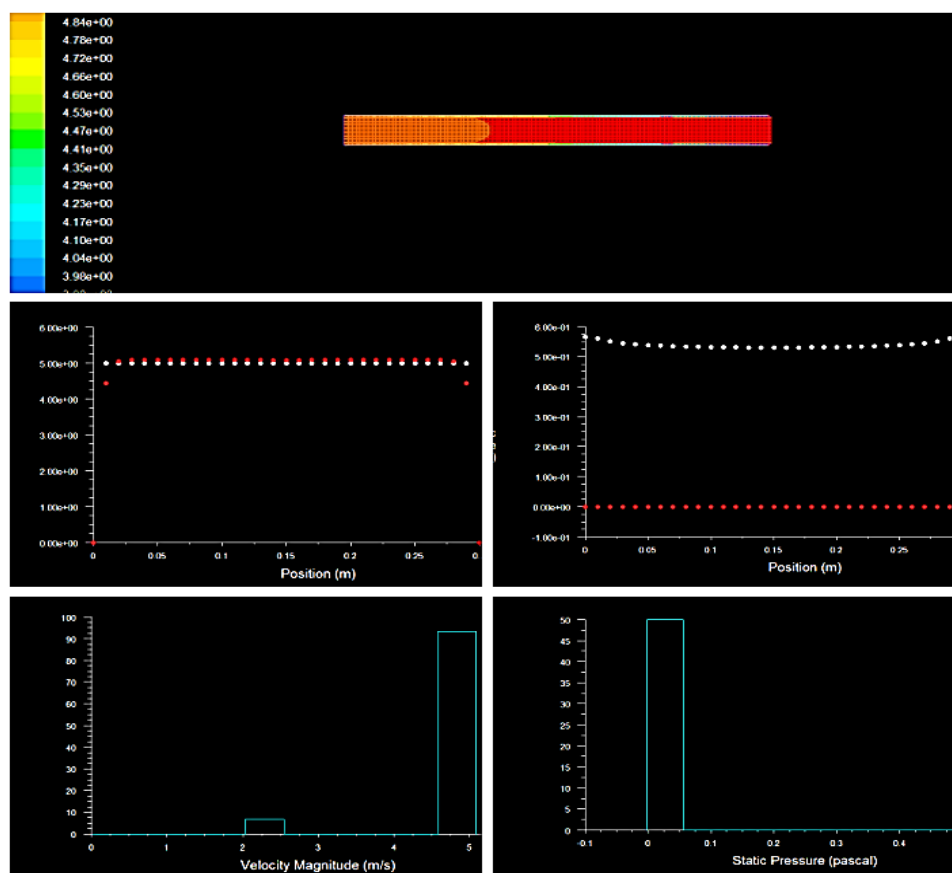


شکل ۱۲. جریان رواناب در مقطع مستطیلی

بررسی نحوه انتشار فشار در مقطع مستطیلی شکل (۱۴) نشان می‌دهد که تغییرات فشار اختلاف زیادی را در ورودی و خروجی مقطع نشان نمی‌دهد. بررسی هسیتوگرام اندازه‌گیری فشار در ورودی و خروجی مقطع شکل (۱۵) نشان می‌دهد که در ورودی و خروجی مقطع نیز تغییرات خاصی مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت که در روابط دبی اشل در مقطع مستطیلی با جریان یکسان تغییرات خاصی مشاهده نمی‌شود. بنابراین نتایج بررسی گراف‌های سرعت و فشار در مقطع مستطیلی نشان می‌دهد که انتشار رواناب در مقاطع مستطیلی بصورت یکجا در تمام سطح مقطع پخش می‌شود، و در نتیجه مقادیر اندازه‌گیری روابط دبی اشل تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد که این موضوع در بررسی گراف اندازه‌گیری شده فشار نیز مورد تایید قرار می‌گیرد (شکل ۱۶). نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که بیشترین میزان فشار در کف و کمترین در دو گوشه کناری در سطح مقطع اتفاق می‌افتد که این امر سبب ایجاد یک جریان میکروگردابه‌ای در قسمت میانی مقطع شده است که موجب حمل رسوبات در قسمت میانی و بالای مقطع و رسوبگذاری در قسمت کناری مقطع می‌شود. تداوم این فرایند همراه با رسوبگذاری محدود در کف باعث می‌شود تا مقاطع مستطیلی شکل با سرعت بیشتری تحول یافته و به سمت مقطع دوزنقه‌ای شکل با سرعت بیشتری تغییر مورفولوژی دهد. لذا به همین علت مقاطع مستطیلی شکل در پروفیل طولی رودخانه یلفان سداکباتان همدان از طول و مسیر کمتری برخوردار است.



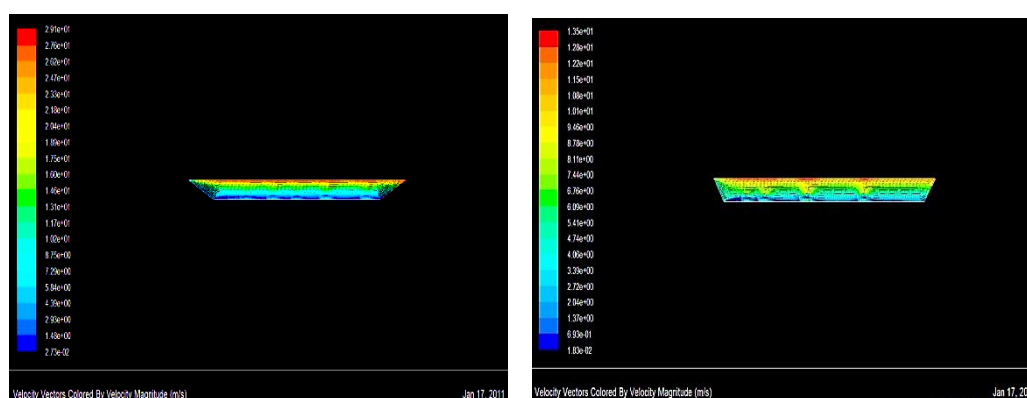
شکل ۱۴. نمودار انتشار فشار رواناب در مقطع مستطیلی شکل ۱۵. هسیتوگرام فشار در ورودی و خروجی مقطع مستطیلی



شکل ۱۶. شبیه‌سازی انتشار رواناب در مقطع مستطیلی

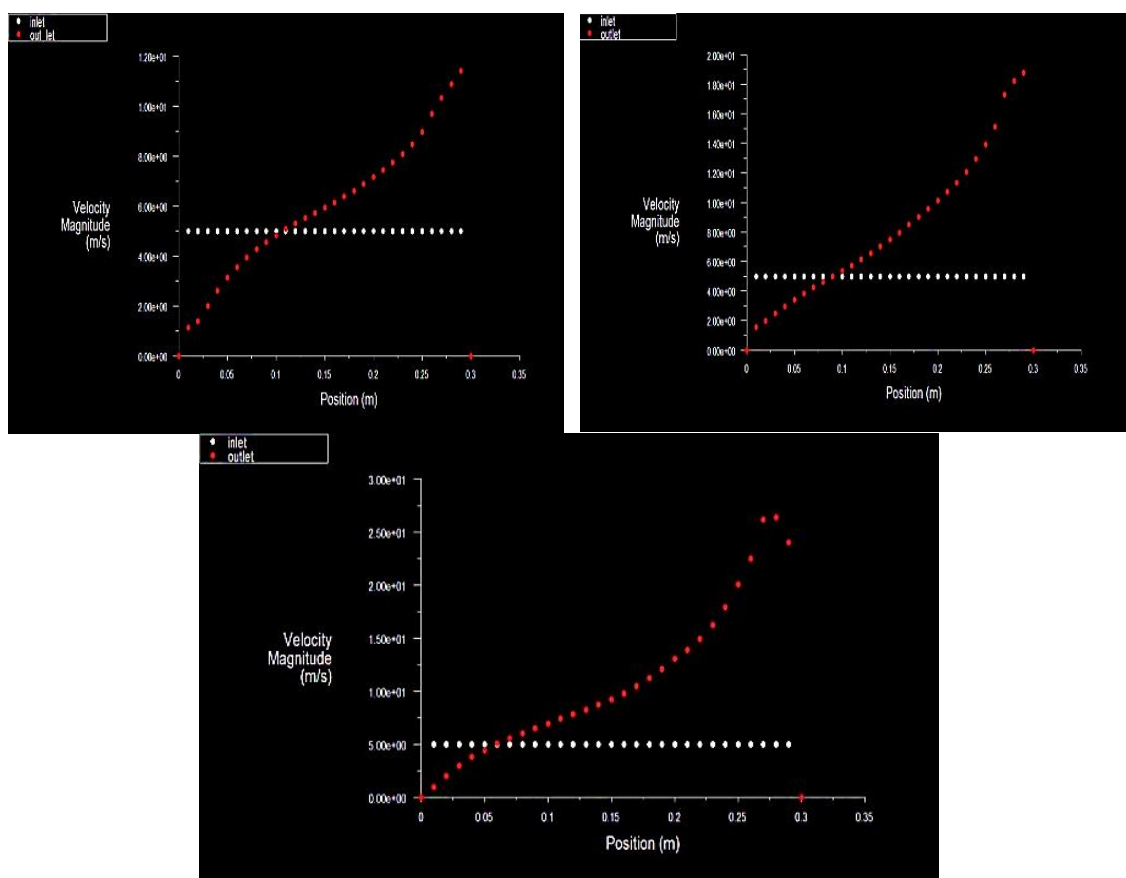
بررسی روابط دبی اشل در مقاطع ذوزنقه‌ای باز

بررسی انتشار رواناب در مقاطع نشان داد که شکل کناره‌های مقطع تاثیر مهمی در روابط دبی - اشل دارد. نتایج شبیه‌سازی دو بعدی انتشار رواناب در مقطع ذوزنقه‌ای نشان می‌دهد که انتشار رواناب با سرعت بیشتر (رنگ قرمز مشخص) در سطح مقطع بیشتر است و بیانگر این است که میزان کف‌کنی در بستر مقاطع ذوزنقه‌ای باز به مراتب کمتر بوده و بیشتر عمل فرسایش به سمت کناره‌ها متمایل می‌شود (شکل ۱۷). نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تمرکز سرعت بالای جریان از گوشه‌های پایینی مقطع شروع و به سمت داخل مقطع هدایت می‌شود. در اثر این روند، یک جریان متلاطم اضافی نیز در بالای سطح مقطع با سرعت ۲۴ متر بر ثانیه ایجاد می‌گردد. در حالی که سرعت در ورودی مقطع به مقدار ثابت ۵ متر در ثانیه لحاظ شده که این میزان افزایش سرعت در سطح مقطع بسیار قابل توجه بوده و بیانگر این است که در مقطع ذوزنقه‌ای بیشترین افزایش میزان سرعت در قسمت وسط و نزدیک به سطح مقطع ایجاد می‌شود. بنابراین در این قسمت‌ها قطعا به دلیل سرعت بیشتر فرسایش بیشتری رخ می‌دهد نتایج شبیه‌سازی تغییرات سرعت انتشار و فشار در این مقطع نشان می‌دهد که فرایندهای فرسایش و رسوبگذاری به شدت صورت می‌پذیرد که موجب کاهش زمان تحول مورفولوژی، تشکیل میکروگردابه‌ها و تغییر مسیر رودخانه از جریان مستقیم به شریانی و حتی پیچان‌رود خواهد شد.



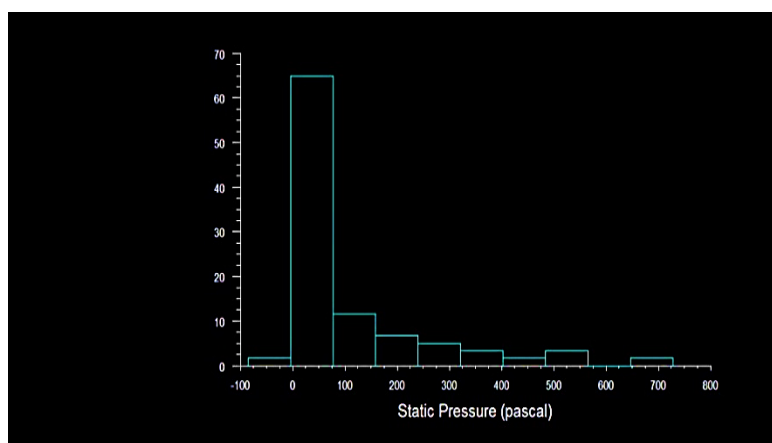
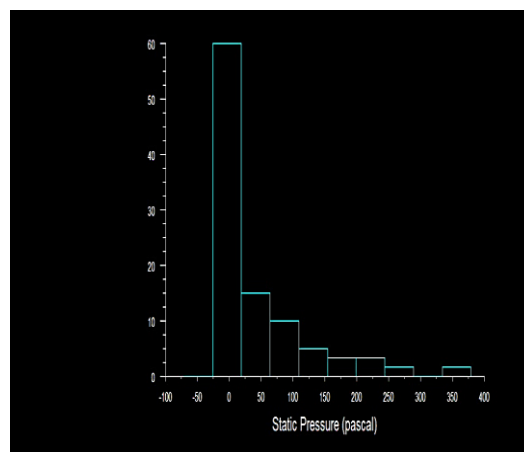
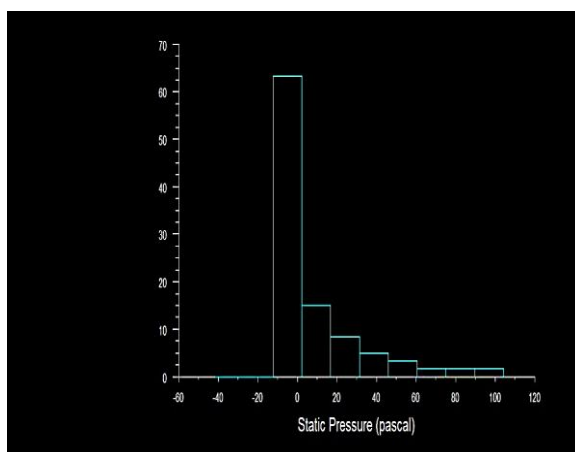
شکل ۱۷. مدل‌سازی دو بعدی انتشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای با مقطع باز

ارزیابی گراف‌های اندازه‌گیری شده روابط دبی اشل نیز نشان می‌دهد که هر چقدر دهانه مقطع دوزنقه‌ای باز تر شود میزان فشار آب از کف بستر کمتر و به سمت دیواره مقطع متمایل می‌شود. این امر نشان می‌دهد میزان فرسایش در مقاطع دوزنقه‌ای در سمت دیوارها بیشتر از کف بستر بوده که موجب ماندگاری شدن رودخانه خواهد شد، که در کاره‌های مهندسی رودخانه مانند احداث دیوار حاشیه رودخانه باید مورد توجه قرار گیرد (شکل ۱۸). بررسی تغییرات فشار نیز نشان می‌دهد که مناطق رسوبگذاری در جداره‌های کناری مقطع و عمده حمل رسوبات در کف مقطع رخ می‌دهد که این موضوع موجب تغییر مورفولوژی مقطع رودخانه از دوزنقه‌ای به سهمی خواهد شد.



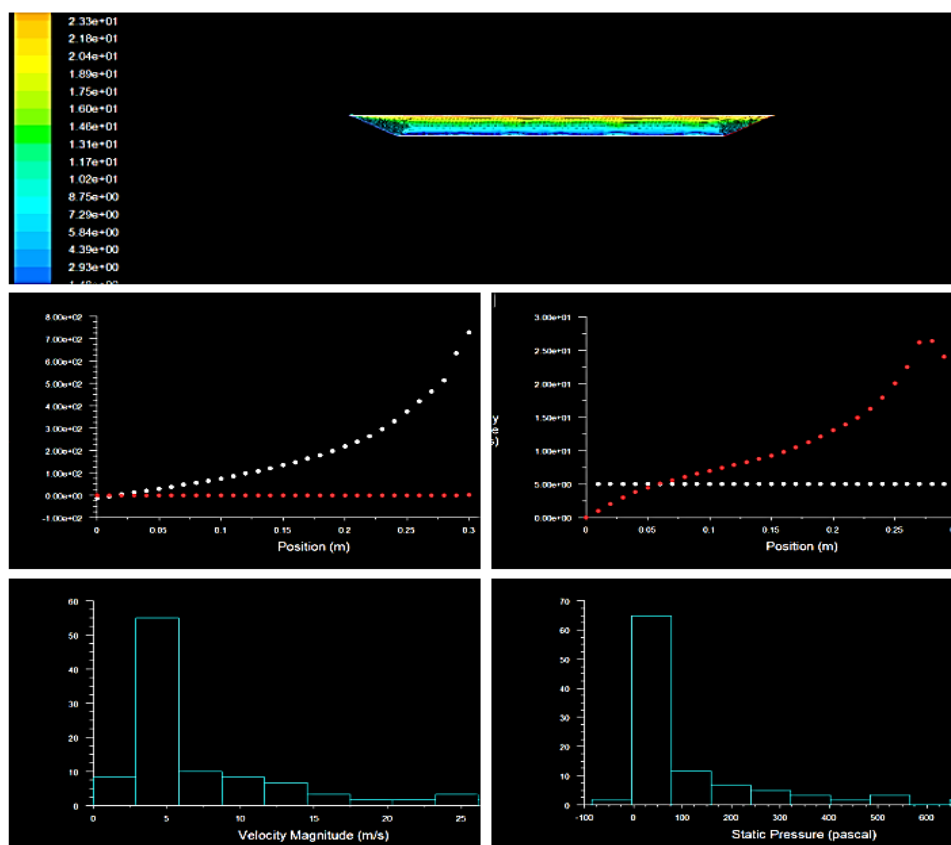
شکل ۱۸. گراف‌های روابط دبی اشل در مقطع دوزنقه‌ای باز

بررسی دقیق هیستوگرام فشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای با مقطع باز نشان می‌دهد که هر چقدر دهانه مقطع دوزنقه‌ای بیشتر باز شود میزان فشار رواناب در کناره‌های بستر بیشتر است و هر چقدر به سمت مرکز بستر نزدیک شویم میزان فشار رواناب کمتر می‌شود. این امر تایید می‌کند که در مقاطع دوزنقه‌ای هر چقدر دهانه دوزنقه بیشتر باز شود میزان فشار رواناب در کناره‌های بستر بیشتر است، بنابراین بیشترین میزان فرسایش در مقاطع دوزنقه‌ای با دهانه باز در کناره‌های بستر بیشتر از مرکز بستر است (شکل ۱۹).



شکل ۱۹. هیستوگرام فشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای با درجه باز شونده

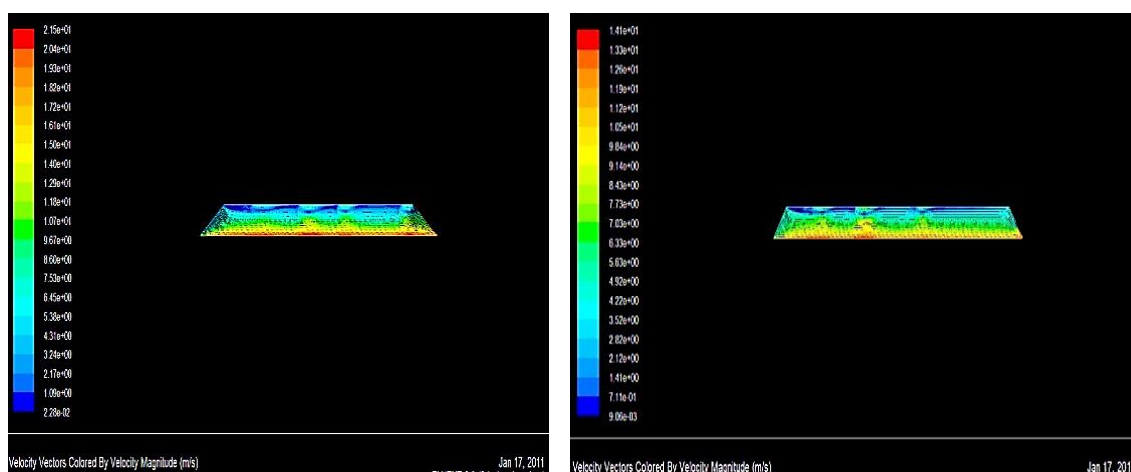
بررسی شکل ۲۰ نشان می‌دهد که سرعت انتشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای باز (رنگ قرمز) در کناره‌های مقطع بیشتر و بنابراین میزان فرسایش در کناره‌های مقطع بیشتر است. اندازه‌گیری گراف دبی اشل نیز این امر را تایید می‌کند. همچنین هیستوگرام‌های فشار نیز تایید می‌کند که میزان فشار آب در کناره‌های مقطع بیشتر از کف بستر است (شکل ۲۰) و نشان می‌دهد که از کف مقطع تا میانه‌های مقطع تغییرات فشار صعودی و از میانه‌های مقطع تا سطح مقطع نزولی می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دیواره‌ها و سطح مقطع تغییرات فشار ثابت و همان روند نزولی در آن حفظ شده است، که با نتایج حاصل از نحوه تغییرات سرعت انتشار و میزان فرسایش و رسوبگذاری مطابقت دارد.



شکل ۲۰. مدل‌سازی انتشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای با مقطع باز

بررسی روابط دبی اشل در مقاطع دوزنقه‌ای بسته

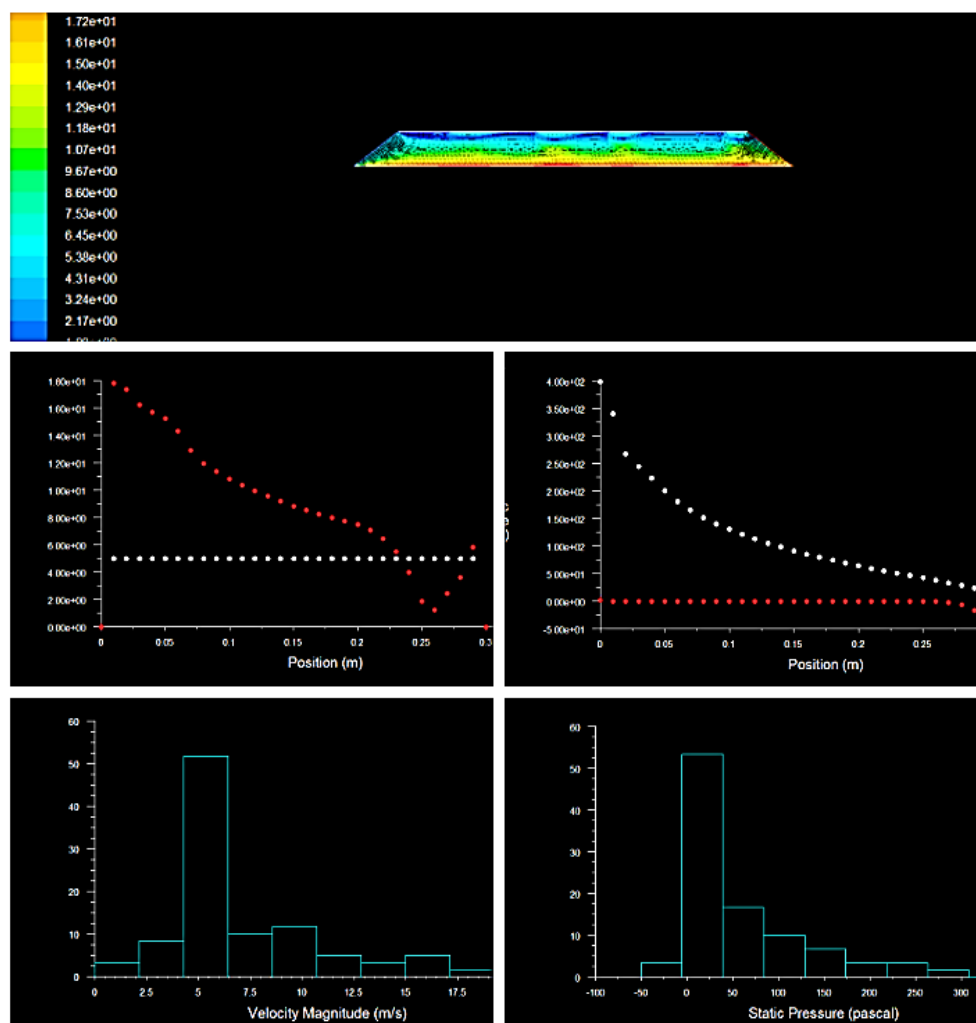
بررسی انتشار رواناب در مقاطع دوزنقه‌ای با مقاطع بسته نشان داد که شکل کناره‌های مقطع عرضی رودخانه تاثیر مهمی در روابط دبی-اشل دارد. نتایج گراف‌های شبیه‌سازی شده انتشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای نشان داد که سرعت انتشار رواناب (قسمت قرمز رنگ) در بستر مقطع عرضی رودخانه یلفان بیشتر از کناره‌ها و عکس حالت مقطع دوزنقه‌ای با مقطع باز است و ثابت می‌کند که میزان کف‌کشی و فرسایش در مقطع دوزنقه‌ای با مقطع بسته بیشتر از کناره‌های مقطع است (شکل ۲۱).



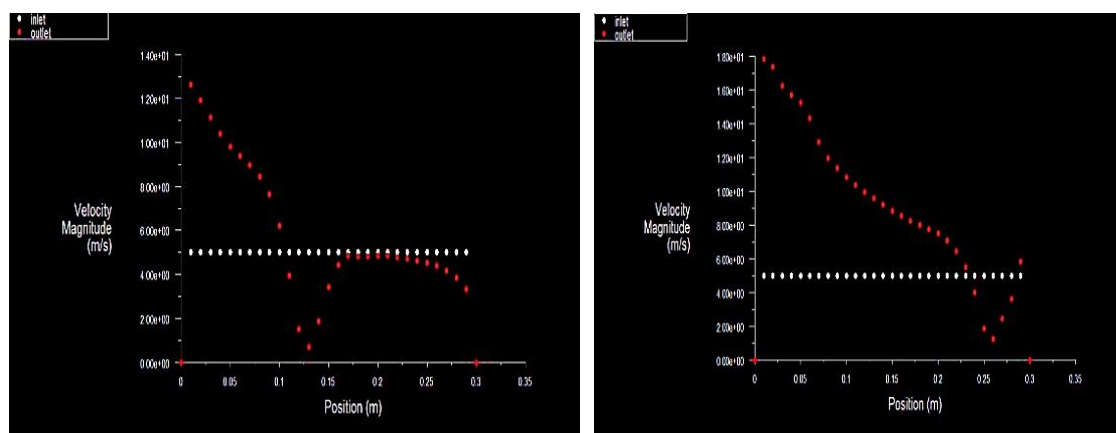
شکل ۲۱. شبیه‌سازی دوبعدی انتشار رواناب در مقطع دوزنقه‌ای با مقطع بسته

اندازه‌گیری روابط دبی اشل در مقاطع ذوزنقه‌ای بسته

بررسی گراف‌های اندازه‌گیری شده روابط دبی اشل نشان می‌دهد که هر چقدر دهانه مقطع ذوزنقه‌ای بسته تر شود میزان فشار آب در کف بستر بیشتر و به سمت دیواره‌های مقطع کمتر می‌شود این امر نشان می‌دهد در مقاطع ذوزنقه‌ای با مقطع بسته میزان فرسایش در بستر بیشتر از کناره‌های مقطع می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت انتشار رواناب در مقاطع ذوزنقه‌ای با مقطع بسته، در بستر مقطع عرضی رودخانه یلفان بیشتر بوده، بنابراین میزان کف کنی در کف مقطع بیشتر است. می‌توان گفت که در کف مقطع میزان فرسایش بیشتر از کناره‌های مقطع است. اندازه‌گیری گراف دبی اشل نیز این امر را تایید می‌کند. همچنین هیستوگرام‌های فشار نیز تایید می‌کند که میزان فشار آب در بستری بیشتر از کناره‌های مقطع است (اشکال ۲۲ و ۲۳). بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر دو فرایند فرسایش و رسوبگذاری در دیواره مقطع به‌شدت فعال بوده و به دلیل شکل هندسی نامنظم مقطع، جریان از سطح مقطع اصلی خارج و به شکل سیلاب به سواحل کناری بستر و حاشیه رودخانه سرازیر می‌شود. بررسی سرعت انتشار - فشار نشان می‌دهد که علت اصلی سیلاب بر اثر حرکت جریان به صورت هلالی از کف به سمت سطح جریان و برعکس در مسیر حرکت جریان آب می‌باشد که باعث می‌شود تا فشار از کف بستر به سمت سطح مقطع جریان بیشتر افزایش یابد و در نتیجه جریان از سطح مقطع اصلی خود خارج و به شکل سیلاب از کناره‌ها و سواحل رودخانه سرازیر شود.



شکل ۲۲. شبیه‌سازی انتشار رواناب در مقاطع دوزنقه‌ای با مقطع بسته



شکل ۲۳. روابط دبی اشل در مقاطع دوزنقه‌ای با دهانه بسته

بحث و نتیجه‌گیری

برآورد تغییرات مقاطع عرضی رودخانه‌ها یک فرایند مهم در مهندسی رودخانه و مدیریت منابع آب است. این برآوردها به منظور درک بهتر رفتار رودخانه، پیش‌بینی سیلاب‌ها، طراحی سازه‌های مهندسی رودخانه‌ای و مدیریت رسوبات انجام می‌شود. در این بررسی شبیه‌سازی در جهت افزایش دقت روابط دبی-اشل، فرسایش و رسوب‌گذاری و بر اساس تغییر سرعت انتشار و فشار آب در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای رودخانه یلفان سد اکباتان همدان با استفاده از تحلیل عددی مدل فلوئنت انجام و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مقطع مستطیلی انتشار رواناب و فشار در سطح مقطع تقریباً یکسان توزیع می‌شود و مقادیر دبی اشل تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد. در مقاطع دوزنقه‌ای با سطح مقطع بسته اندازه‌گیری دبی اشل نشان داد که انتشار رواناب با سرعت و فشار بیشتر در کف مقطع موجب افزایش فرسایش در کف می‌شود. در مقطع دوزنقه‌ای با سطح مقطع باز مقادیر دبی اشل و هیستوگرام‌های فشار و سرعت انتشار تایید نمود که فشار و سرعت انتشار در کناره‌های مقطع بیشتر بوده لذا میزان فرسایش در کناره‌ها بیشتر است. که با نتایج مظفری و همکاران (۱۴۰۱)، هانگ و همکاران (۲۰۲۴) و جمالی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت دارد.

نتایج نشان داد که با لحاظ کردن شکل مقطع رودخانه و میزان سرعت انتشار جریان و فشار در رودخانه می‌توان میزان فرسایش و رسوبگذاری را در بستر و کناره‌های رودخانه به خوبی مکانیابی و مشخص نمود. نتایج نشان می‌دهد که شکل مقاطع دارای اهمیت ویژه‌ای در روابط دبی-اشل و تغییر بستر رودخانه دارد. به‌طوری که با بررسی دقیق مقاطع رودخانه می‌توان خطای ناشی از دبی که به شدت به سرعت انتشار جریان و نوع مقطع رودخانه بستگی دارد را در معادلات و محاسبات مربوط به رسوب و دبی-اشل لحاظ و اصلاح نمود. بعلاوه با توجه به رخداد سیلاب و تغییر سرعت انتشار و فشار جریان و تفاوت قابل ملاحظه این دو پارامتر مهم در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای می‌توان از نتایج چنین بررسی در طراحی سازه‌های کنترلی و حفاظتی به‌خوبی بهره‌برداری نمود و با دقت مناسب و قابل قبولی در رودخانه‌های طبیعی برآورد دقیق‌تری از فرسایش و رسوب در مقاطع مختلف و رخداد سیلاب ارائه نمود. چنانچه نتایج نشان داد که رابطه منحنی دبی-اشل با سرعت انتشار و فشار در مقطع دوزنقه‌ای باز موجب سیلاب و شدت در فرسایش در کناره‌های مقطع می‌شود که با نتایج علی نوری و همکاران (۱۴۰۱) و جمالی و همکاران (۱۴۰۲) هم‌خوانی دارد و این موضوع نشان می‌دهد که شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی با مدل‌های ریاضی می‌تواند یکی از مشکلات اصلی در شناخت و کمی کردن متغیرهای

حاکم بر جریان، فرسایش و رسوب را با دقت قابل قبولی حل نماید. نتایج بررسی روابط دبی اشل نشان داد هر چقدر دهانه مقطع دوزنقه‌ای بسته تر باشد میزان فشار در کف بیشتر و در دیواره مقطع عرضی رودخانه کمتر و در نتیجه میزان فرسایش در بستر بیشتر می‌باشد. برعکس هر چقدر دهانه دوزنقه بیشتر باز شود میزان فشار رواناب در کناره‌های بستر بیشتر و در نتیجه میزان فرسایش بیشتر است. لذا نتایج نشان داد که به علت تغییر رابطه دبی اشل و سرعت جریان و فشار در مقاطع مختلف میزان فرسایش و رسوبگذاری به شدت تغییر می‌یابد. بررسی انتشار رواناب نشان داد که شکل مقاطع عرضی رودخانه تاثیر مهمی در ایجاد ناپایداری بستر رودخانه دارد و موجب مماندگی شدن و جابجایی مسیر رودخانه می‌شود، که در کاره‌های مهندسی رودخانه باید مورد توجه قرار گیرد که با نتایج احمد و همکاران (۲۰۲۴)، قوش و همکاران (۲۰۲۴) و هانگ و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مقاطع رودخانه یلفان در طول پروفیل طولی رودخانه موجب تغییرات کف کنی و فرسایش کناره‌ای می‌شود. به طوری که در ابتدای جریان با مقطع دوزنقه‌ای، به دلیل تغییر سرعت انتشار جریان و فشار، فرسایش و کف کنی بیشتر از کناره‌ها است. در حالی که در مقاطع مستطیلی در میانه و انتهای جریان فرسایش کناره‌ای و رسوبگذاری بستر مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رابطه دبی - اشل به دلیل تاثیر عوامل مختلف و خطای اندازه‌گیری و حتی ماهیت تصادفی بودن داده‌های رودخانه و خطای موجود در تخمین آن‌ها همواره با نوعی عدم قطعیت نیز روبرو است. لذا به کارگیری مدل‌های ریاضی مانند فلوئنت مستلزم دسترسی مناسب به اطلاعات مناسب است، تا با اطمینان بیشتری بتوان خروجی حاصل از مدل را به کار گرفت که با نتایج وطن چی و همکاران (۱۴۰۱)، لای و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد.

اساس بررسی روابط دبی - اشل در این تحقیق استفاده از دو پارامتر مهم و موثر بر فرایند جریان در رودخانه‌های طبیعی سرعت انتشار و فشار جریان با تحلیل کانتورهای سرعت و فشار به شکل بی بعد در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در رودخانه یلفان همدان با استفاده از مدل ریاضی فلوئنت بود که با توجه به دقت خوب شبیه‌سازی تغییر مقاطع و تحول مسیر رودخانه یلفان می‌توان به عنوان یک روش دقیق‌سازی رابطه دبی - اشل در طراحی بکار گرفت. به طوری که با استفاده از داده‌های خروجی این مدل می‌توان به ازای هر مقطع و عمق جریان سرعت و مکان فرسایش و رسوبگذاری را در مقاطع مختلف تعیین و به عنوان یک ابزار مهم با تلفیق منحنی دبی - اشل در طراحی و ساماندهی رودخانه به ویژه در زمان سیلاب استفاده نمود که با نتایج جمالی و همکاران (۱۴۰۲)، محمدی و همکاران (۱۴۰۲)، بوستانی و همکاران (۱۴۰۲)، احمدی و همکاران (۲۰۲۱) و رستمی و همکاران (۱۴۰۳) همخوانی دارد. نتایج نشان داد که مدل‌سازی پدیده انتشار رواناب در محیط فلوئنت دارای دقت قابل قبول می‌باشد، اما تولید فایل هندسه و شبکه میدان حل در نرم‌افزار گمبیت با استفاده از نقشه توپوگرافی نیاز به صرف زمان زیادی می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای مدل‌سازی در حوزه‌های آبخیز بزرگ از دیگر نرم‌افزارها برای ایجاد هندسه و مدل‌سازی استفاده و برای مدل‌سازی در حوزه‌های آبخیز کم وسعت که نیاز به دقت بالا می‌باشد از مدل فلوئنت استفاده شود.

منابع

- ایلدرمی، ع، شیخی، آ.، ۱۳۹۵. بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه و نقش آن در فرسایش و رسوبگذاری با استفاده از HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه خرم آباد-دوآب ویسان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۳، صص ۱۴۶-۱۶۳.
- ایلدرمی، ع، ر، محمدپناه مقدم، م. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه سیمینه رود همدان با استفاده از مدل عددی فلوئنت، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۱۱۲-۱۲۹.

- ایلدیمی، ع. ر.، ۱۴۰۱. شبیه‌سازی الگوریتم الگوی حرکت ذرات رسوبی رودخانه سد اکباتان با استفاده از مدل عددی فلوئنت، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۲، صص ۱۴-۳۱.
- بایزیدی، م.، کرمی، ن.، ۱۳۹۶. پیش‌بینی روند رسوبگذاری در رودخانه قره سو با استفاده از مدل GSTARS 3، مجله محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۳، شماره ۱، صص ۶۶-۸۰.
- باقری، ع.، ۱۴۰۲. ارزیابی روش‌های محاسبه منحنی دبی-اشارل بر اساس روابط مقاومت فرم بستر در ایستگاه هیدرومتری آبلو نکارود مازندران، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۱۷، شماره ۳، صص ۴۹۳-۵۰۳.
- بوستانی، آ.، خدشناس، س. ر.، اسماعیلی، ک.، ۱۴۰۲. بررسی توزیع تنش برشی بستر در کانال‌های مرکب مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه نتایج Ansys Fluent و Flow-3D، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۱۷، شماره ۲.
- جباری، ا.، قبادیان، ر.، خان محمدی، ف.، ۱۴۰۱. شبیه‌سازی تغییرات بستر پیوندگاه رودخانه‌های گاماسیاب و قره سو در سیلاب نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۲، صص ۷۱-۸۷.
- جمالی، ع. ر.، امین نژاد، ب.، ظهیری، ع. ر.، ۱۴۰۲. استخراج رابطه دبی-اشارل مقاطع مرکب چند سیلاب دشتی با مدل‌های یک بعدی و دوبعدی، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۳۰، شماره ۴، صص ۱۰۳-۱۲۳.
- خانجانی زوراب، م.، ایلدیمی، ع. ر.، نوری ح.، ۱۳۹۹. بررسی انتقال رسوب و تغییرات بستر رودخانه یلفان سداکباتان همدان، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۳، صص ۵۰-۶۹.
- رستمی، م.، امینی، ر.، ظهیری، ع. ر.، ۱۴۰۳. مدل سه‌بعدی توسعه داده شده برای استخراج رابطه دبی-اشارل در مقاطع مرکب چندسیلاب دشتی مستقیم، نشریه هیدرولیک، دوره ۱۹، شماره ۲، صص ۱۱۹-۱۳۸.
- عزیزی، ش.، ایلدیمی، ع. ر.، نوری ح.، ۱۳۹۸. تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه آبشینه همدان، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۸، شماره ۲، صص ۲۰۹-۱۸۹.
- علی نوری، پ.، بی جن خان، م.، ۱۴۰۲. بررسی میزان تعمیم‌پذیری نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی به رودخانه‌های طبیعی برای تخمین منحنی دبی-اشارل، نشریه مهندسی منابع، دوره ۱۶، شماره ۵۷، صص ۳۱-۴۶.
- گودرزی، ا.، اله یونسی، ح.، شاهی‌نژاد، ب.، ترابی، ح.، ۱۴۰۱. مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و فرسایش کنار رودخانه‌ای در شرایط سیلابی مطالعه موردی حوزه آبریز کشکان، نشریه هیدروژئومورفولوژی، دوره ۹، شماره ۳۱، صص ۱۳۷-۱۵۷.
- صالحی، م.، فراهادی، ع. ر.، خانی تملیه، ذ.، احمدپور، ظ.، ۱۳۹۷. مدل‌سازی عددی امواج ناشی از شکست سد سنگی-ملاتی در زیرحوضه نوشان آذربایجان غربی، نشریه محیط زیست و توسعه، دوره ۴، شماره ۲، صص ۹۰-۱۰۰.
- ظهیری، ع.، قلی نژاد، ج.، دهقانی، ا.، ۱۳۹۸. محاسبه ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌ها به کمک مدل ریاضی شبه دوبعدی، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، سال ۱۰، شماره ۱۹، صص ۱۴۲-۱۵۳.
- محمدی، م.، فغفور مغربی، م.، ۱۴۰۲. تخمین منحنی دبی-اشارل در رودخانه‌های طبیعی با جریان غیردائمی با استفاده از روش مبتنی بر کنتورهای هم سرعت، نشریه هیدرولیک، دوره ۱۸، شماره ۲، صص ۱-۲۰.
- مظفری، ح.، اصغری سراسکانرود، ص.، اسفندیاری درآباد، ف.، ۱۴۰۱. مدل‌سازی تغییرات فرسایش و رسوب رودخانه سجاسرود قبل و بعد از ساخت سد گلابر با روش GCD، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۳، صص ۵۷-۸.
- محمدزاده وطن چی، س.، فغفور مغربی، م.، ۱۴۰۱. تحلیل عدم قطعیت منحنی‌های دبی-اشارل در رودخانه‌ها، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۵۲، شماره ۱۰۶، صص ۱۵۷-۱۶۷.
- نبی‌زاده ولوکلائی، م.، ظهیری، ع. ر.، دهقانی، ا.، مفتاح هلقی، م.، ۱۴۰۲. واسنجی هیدرولیک جریان و رسوب مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت در رودخانه زارمرو، نشریه آب و آبیاری ایران، دوره ۱۳، شماره ۴، صص ۶۶-۸۴.

Ahmad, D., Afzal, M., and Ishaq, M. (2024). Impacts of riverbank erosion and flooding on communities along the Indus River, Pakistan. *Natural Hazards*, 120(1), 131-152. DOI: [10.1007/s11069-023-06216-2](https://doi.org/10.1007/s11069-023-06216-2)

Ahmadi, A., and Maghrebi, M.F. (2021). A robust approach for rating curves estimation in open channels using isovel contours. *International Journal of River Basin Management*, 19(3), 281-296.

[10.1080/15715124.2019.1687486](https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1687486)

FLUENT Inc. (2006). FLUENT 6.3. User s and Tutorial Guide Manual, Lebanon, USA.

Ghosh, D., and Saha, S. (2024). Identifying river bank erosion potential zones through geo-spatial and binary logistic regression modeling approach: a case study of river Ganga in Malda district (India). *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(1), 81-98. doi.org/10.1007/s40808-023-01740-3

Huang, P. C. (2024). Estimation of riverbank erosion by combining channel morphological models with AI techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2359983. doi.org/10.1080/19475705.2024.2359983

Kim, T. T., Ngoc, P., Nga, T. N. Q., Nguyet, N. T. T., Truong, H. N., Diem, P. T. M., and Bay, N. T. (2023). Modifying BEHI (Bank Erosion Hazard Index) to map and assess the levels of potential riverbank erosion of highly human impacted rivers: a case study for Vietnamese Mekong River system. *Environmental Earth Sciences*, 82(23), 554. DOI:[10.1007/s12665-023-11249-8](https://doi.org/10.1007/s12665-023-11249-8)

Lai, Y. G., and Wu, K. (2019). A Three-Dimensional Flow and Sediment Transport Model for Free-Surface Open Channel Flows on Unstructured Flexible Meshes. *Fluids*, 4(1), 18. doi.org/10.3390/fluids4010018

Salawu, O. G., and Leke, D. (2024). Assessment of Changes in Channel Width and Braiding: The Implications on Flooding Upstream of Shiroro Reservoir in river Kaduna, Kaduna State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 28(1), 179-186. DOI:[10.4314/jasem.v28i1.20](https://doi.org/10.4314/jasem.v28i1.20)

Zhao, Q., Misra, S., Svendsen, I., and Kirby, j. (2004). Numerical study of turbulent hydraulic jump. ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Delaware Newmark.