

## Numerical simulation of velocity distribution in sediment-laden flows in an open channel using FLOW-3D model

M. Nasrabadi<sup>1\*</sup>, S. Faraji<sup>2</sup> and M. H. Omid<sup>3</sup>

### Extended Abstract

#### Introduction:

The velocity distribution in sediment-laden flows is an important and fundamental parameter for calculating the rate of suspended sediment transport. Previous studies have shown that suspended sediments significantly alter the velocity distribution in open channel flows and river systems. Suspended sediments tend to reduce the shear rate near the bed. This occurs because a part of the energy from the flow turbulence is spent on keeping sediment-laden particles in suspension, reducing the energy available for momentum transfer near the boundary. Also, the presence of suspended sediments suppresses the flow turbulence. Therefore, the velocity gradient near the bed shrinks. Consequently, ignoring the presence of these particles in the flow can cause significant errors in the estimation of parameters such as flow discharge and sediment discharge in rivers. Despite efforts to develop relationships for estimating the velocity distribution in sediment-laden flows, the estimation of the parameter is associated with a significant error, and it is essential to use a reliable method that is capable of accurately predicting the velocity distribution while considering the effects of suspended sediments. For this reason, the use of numerical models is a great help to researchers studying the mechanism of suspended sediment transport.

#### Materials and Methods:

In order to validate and calibrate the results of the numerical model, two laboratory data sets covering a wide range of hydraulic conditions were utilized. The first set of data was from the experiments by Einstein and Chien (1955) which were conducted in a flume 0.307 m wide, 0.357 m high, and 120 m long. These tests were performed on smooth and rough beds with slopes of 0.00185 and 0.0025. Sediment particles with diameters of 1.3, 0.94, and 0.274 mm were used. Sediment concentrations were determined by collecting point samples from the flow using a tube. At each sampling point, three to 15 samples with a volume of one liter were taken. About 16 data sets were chosen from the first set of experiments. The second set of data originated from the experiments of Vanoni (1946) conducted in a rotating flume with 0.305 m deep, 0.845 m wide, and 18.3 m long. The number of measurement points varied from 7 to 17, covering 2% of the flow depth. The flow rate varied from 28.3 to 155.7 L/s. The bottom of the flume was covered with sand particles with an average diameter of 0.47 mm and 0.88 mm. In the current study, Flow-3D software was used as a numerical simulation tool. Flow-3D software is a comprehensive software package in the field of computational fluid dynamics. This software package uses advanced numerical techniques to solve three-dimensional equations of fluid motion for multiphase problems.

#### Results and discussions:

By examining the experimental data of relative velocity ( $u/u^*$ ) versus relative depth ( $y/h$ ) at different sediment concentrations on a semi-logarithmic scale, it was observed that the presence of suspended sediments in the flow caused a deviation from the logarithmic distribution observed in the experimental data. The amount of change in the inner region was greater than that in the outer region. After running the numerical model with different mesh sizes, a mesh size of 10 mm was selected as the optimal mesh size for running the numerical model in this study. The K- $\epsilon$  model was selected as the turbulence model for the present study. After ensuring

1- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Former M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Professor, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran.

\* Corresponding Author: [m-nasrabadi@araku.ac.ir](mailto:m-nasrabadi@araku.ac.ir)

Received: 2025/08/09

Accepted: 2025/09/26

the performance of the FLOW-3D numerical model in estimating the velocity distribution of sediment-laden flows, the effect of parameters such as bed roughness, suspended sediment diameter, and initial flow concentration on the velocity distribution was investigated. The purpose of this section is to simulate conditions that cannot be achieved in the laboratory, and the use of a numerical model provides valuable insights into the sediment-laden flow pattern.

## Conclusions:

The results showed that the FLOW-3D numerical model demonstrated acceptable accuracy in estimating velocity values at different depths. The average error rate of the numerical model in estimating velocity distribution values was 12.6% for Vanoni data and 75.3% for Einstein and Shen data. In general, it can be said that the numerical model overestimates velocity values at shallow depths (inner region of velocity distribution) and underestimates them at greater depths (outer region) compared with the measured values. These results indicate that using the FLOW-3D numerical model provides a more accurate estimation of velocity in sediment-laden flow than employing empirical relations.

**Keywords:** FLOW-3D Model, K- $\epsilon$  turbulence model, Suspended sediments, Velocity distribution.

**Citation:** این قسمت توسط دفتر مجله تکمیل خواهد شد.

Copyright:

© Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## شبیه‌سازی عددی توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق در کانال باز با مدل FLOW-3D

محسن نصرآبادی<sup>۱\*</sup>، ساناز فرجی<sup>۲</sup> و محمدحسین امید<sup>۳</sup>

### چکیده

توزیع سرعت در جریان حاوی رسوبات معلق از پارامترهای مهم در برآورد دبی بار معلق در رودخانه‌ها محسوب می‌شود که برآورد دقیق‌تر آن سبب افزایش دقت در برآورد دبی بار معلق خواهد شد. در تحقیق حاضر، به‌منظور شبیه‌سازی عددی توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. برای این منظور، مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معتبر واسنجی و صحت‌سنجی گردید. پس از بررسی مدل‌های آشفتگی مختلف، مدل K- $\epsilon$  به‌عنوان مدل آشفتگی برتر انتخاب شد. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل عددی FLOW-3D دقت قابل‌قبولی در برآورد مقادیر سرعت در عمق‌های مختلف دارد؛ به‌طوری‌که خطای آن در برآورد مقادیر سرعت در عمق‌های مختلف برای داده‌های آزمایشگاهی ونونی و اینشتین و شن به‌ترتیب برابر با ۶/۱۲ و ۳/۷۵ درصد می‌باشد. به‌طورکلی، مدل عددی در عمق‌های کم (ناحیه داخلی توزیع سرعت) مقادیر سرعت را بیشتر و در عمق‌های بیشتر (ناحیه خارجی) مقادیر سرعت را کمتر از مقادیر آزمایشگاهی شبیه‌سازی کرده است. پس از اطمینان از نتایج مدل عددی، اثر تغییر در پارامترهایی همچون قطر، غلظت رسوبات معلق و زبری بستر بر توزیع سرعت جریان شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که عملکرد نرم‌افزار FLOW-3D در برآورد توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق در شرایط مختلف هیدرولیکی جریان بهتر از روابط تجربی است.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع سرعت، رسوبات معلق، مدل آشفتگی K- $\epsilon$ ، نرم‌افزار FLOW-3D.

**ارجاع:** این قسمت توسط دفتر مجله تکمیل خواهد شد.

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۲- دانشجوی سابق کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

\* نویسنده مسئول: [m-nasrabadi@araku.ac.ir](mailto:m-nasrabadi@araku.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

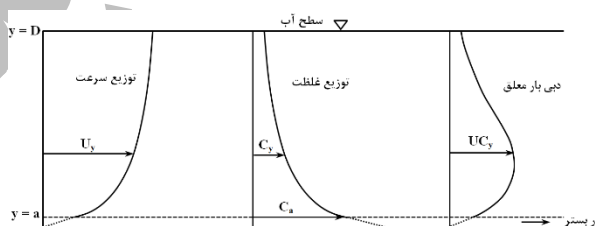
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

## مقدمه

ورود رسوبات معلق به جریان آب رودخانه‌ها پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است، چرا که این رسوبات حدود ۸۰ درصد از کل بار رسوبی رودخانه‌ها را تشکیل می‌دهند. از آنجا که وجود ذرات معلق سبب تغییرات قابل توجهی در مقاومت جریان و همچنین توزیع سرعت می‌شود، باید اثر آنها بر پارامترهای هیدرولیکی جریان بررسی شود. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که پژوهشگران به دنبال محاسبه دبی بار معلق باشند، به دلیل اینکه، براساس رابطه زیر و شکل ۱، یکی از پارامترهای اصلی در محاسبه این پارامتر، توزیع سرعت جریان است (Van Rijn, 1993):

$$q_s = \int_a^D UC dy \quad (1)$$

در این رابطه،  $q_s$  دبی رسوبات معلق،  $a$  ارتفاعی از بستر کانال که از آن ارتفاع به بعد، رسوبات به صورت معلق حرکت می‌کنند،  $D$  عمق جریان،  $U$  توزیع سرعت جریان در اعماق مختلف  $y$  بالای بستر و  $C$  توزیع غلظت رسوبات در اعماق مختلف  $y$  بالای بستر است (شکل ۱).



شکل ۱- منحنی توزیع سرعت، توزیع غلظت و دبی رسوبات معلق (Nasrabadi et al., 2013)

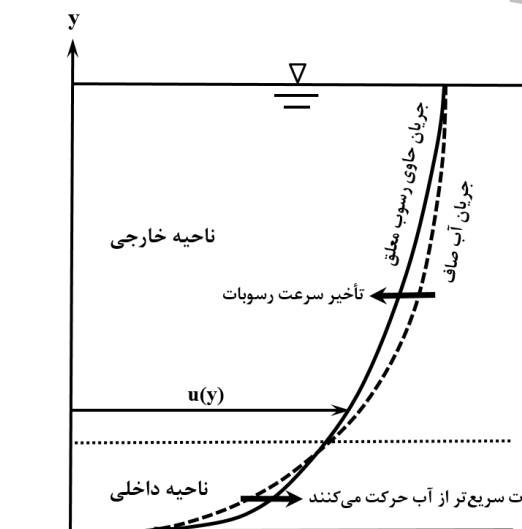
در حال حاضر، پژوهشگران اغلب از معادله راوس برای برآورد توزیع غلظت رسوبات معلق و از توزیع لگاریتمی سرعت استفاده می‌کنند (Omid and Nasrabadi, 2012). اما در شرایطی که جریان دارای بار رسوبی معلق یا غلیظ باشد، بسته به میزان دبی و سرعت جریان، غلظت و قطر ذرات رسوبی، توان حمل جریان و نیز اصطکاک داخلی ذرات آب و رسوب، متفاوت خواهد بود. توزیع لگاریتمی که اولین بار به وسیله تنودور ون کارمن معرفی شد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) + C_1 \quad (2)$$

در این رابطه،  $u$  سرعت در عمق  $y$ ،  $u_*$  سرعت برشی،  $\kappa$  ثابت ون-کارمن (برای آب صاف برابر ۰/۴۱ است) و  $y_0$  عمقی است که در آن سرعت صفر رخ می‌دهد و  $C_1$  ضریب ثابت تجربی است. ساده بودن این رابطه و همچنین کم بودن تعداد متغیرهای موجود در آن، از

مزایای این توزیع محسوب می‌شود. به همین دلیل بیشتر روابط انتقال رسوبات بر مبنای توزیع لگاریتمی سرعت توسعه یافته‌اند. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده است که رسوبات معلق به طور قابل توجهی توزیع سرعت را در جریان کانال‌های باز و سیستم‌های رودخانه‌ای تغییر می‌دهند (Nordin and Dempster, 1963; Coleman, 1986 و Patel and Sarkar, 2023).

این رسوبات معلق تمایل دارند سرعت جریان را در نزدیکی بستر کاهش دهند. این اتفاق به این دلیل رخ می‌دهد که مقداری از انرژی ناشی از آشفتگی جریان صرف معلق نگه داشتن ذرات رسوب می‌شود و انرژی موجود برای انتقال اندازه حرکت در نزدیکی مرز را کاهش می‌دهد. همچنین، وجود رسوبات معلق، آشفتگی جریان را کاهش داده و گرادیان سرعت در نزدیکی بستر کمتر می‌شود. بنابراین، نادیده گرفتن وجود این ذرات در جریان می‌تواند خطای قابل توجهی در برآورد پارامترهایی مانند دبی جریان و دبی رسوبات در رودخانه‌ها ایجاد کند. شکل ۲ تغییرات توزیع سرعت در اثر وجود رسوبات معلق در جریان را نشان می‌دهد (Yu et al., 2014). همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود ذرات معلق در ناحیه داخلی به دلیل تقلیل گردابه‌ها سبب افزایش سرعت جریان و در ناحیه خارجی سبب کاهش آن می‌شود.



شکل ۲- تغییرات توزیع سرعت در اثر حضور رسوبات معلق در جریان (Yu et al., 2014)

به طور کلی دو دیدگاه در مورد توزیع سرعت جریان‌های حاوی رسوبات معلق وجود دارد. دیدگاه اول بیان می‌کند که توزیع لگاریتمی در جریان‌های حاوی رسوبات معلق نیز کاربردی است و ضریب ثابت ون کارمن با افزایش غلظت رسوبات کاهش می‌یابد (دیدگاه کارمن). پژوهشگرانی همچون Vanoni (1946)، Einstein and Chien (1955) و Elata and Ippen (1961) از

این ایده حمایت کردند. دیدگاه دیگر این است که ثابت ون کارمن با افزایش غلظت رسوبات کاهش نمی‌یابد و توزیع سرعت در ناحیه اصلی جریان از قانون لگاریتمی منحرف می‌شود. پژوهشگرانی همچون Parker and Coleman (1986) از این ایده حمایت کردند.

Vanoni and Einstein and Chien (1955), Vanoni (1946) (1960) Nomicos و Elata and Ippen (1961) به‌طور آزمایشگاهی نشان دادند که قانون لگاریتمی در کل جریان قابل کاربرد است و ادعا کردند که مقدار ثابت ون کارمن با افزایش غلظت رسوبات کاهش می‌یابد. Coleman (1986) نشان داد که غلظت رسوبات بر مقدار ثابت ون کارمن در ناحیه نزدیک بستر تأثیر نمی‌گذارد. Parker and Coleman (1986) و Cioffi and Gallerano (1991) از ایده Coleman حمایت کردند. بنابراین می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که قانون لگاریتمی در ناحیه داخلی با مقدار  $0.41$  ون کارمن قابل کاربرد است و زمانی که قانون لگاریتمی به ناحیه خارجی بسط داده شود، مقدار ثابت ون کارمن با تعلیق رسوبات کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که تعلیق رسوبات اثر معنی‌داری بر توزیع سرعت در ناحیه خارجی می‌گذارد.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه توزیع سرعت جریان آب صاف به‌صورت عددی و آزمایشگاهی انجام شده و روابط مختلفی نیز برای این منظور ارائه شده است (Yang et al., 1979; Schlichting, 2004; Coles, 1956; Guo and Julien, 2008; Keulegan, 1938).

Nasrabadi et al. (2012) معتبرترین معادلات توسعه‌یافته برای محاسبه توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق در کانال‌های باز شامل توزیع لگاریتمی، توزیع لگاریتمی اصلاح شده، توزیع ویک (wake)، توزیع لگاریتمی اصلاح‌شده-ویک، توزیع لگاریتمی-ویک اصلاح شده و توزیع سهموی را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که توزیع ویک بیشترین دقت را در میان معادلات دارد؛ به‌طوری که در غلظت‌های کم، این توزیع بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق بوده و با افزایش غلظت، میزان انحراف از داده‌ها نسبت به معادلات دیگر کمتر است.

به دنبال توسعه مدل‌های عددی دقیق، تاکنون مطالعات متعددی در زمینه شبیه‌سازی عددی جریان‌های حاوی بار رسوبی معلق انجام شده است. Umeyama (1992) و Umeyama (1999) با در نظر گرفتن فرضیه‌ای جدید برای طول اختلاط در جریان حاوی رسوبات معلق، یک راه‌حل تحلیلی و ریاضی برای توزیع سرعت و غلظت رسوبات معلق ارائه داد. وی راه‌حل محاسباتی خود را با داده‌های ونونی و اینشتین مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که این راه‌حل فقط برای رسوبات با قطر  $0.94$  تا  $1.3$  میلی‌متر با داده‌های

آزمایشگاهی مطابقت دارد. (Tsai and Tsai (2000) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، توزیع سرعت و غلظت رسوبات معلق را محاسبه کردند و تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی بدست آوردند. Binesh and Bonakdari (2016) یک مدل تحلیلی برای برآورد توزیع سرعت جریان آشفته و کاملاً توسعه‌یافته، بر مبنای معادلات میانگین‌گیری‌شده رینولدز ناویراستوکس (RANS) و یک توزیع لزجت گردابی را توسعه دادند. مدل پیشنهادی آنها قابلیت کاربرد در هر دو دسته کانال‌های عریض و کم‌عرض را دارد. این مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در کانال‌های آزمایشگاهی مستطیلی و نیز داده‌های حاصل از یک سایت واقعی کانال فاضلاب مقایسه و معتبرسازی شده است. (Jafari et al. (2016) به مطالعه عددی توزیع سرعت جریان روی بستر زبر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت (FLUENT) و به روش حجم محدود پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در جریان روی بستر زبر سرعت جریان و در نتیجه تنش‌برشی در طول جریان روند افزایشی داشته است. همچنین در جریان روی بستر زبر شیب سطح آب روند افزایشی داشته و افت انرژی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود تلاش در جهت توسعه روابطی برای برآورد توزیع سرعت در جریان حاوی رسوبات معلق، برآورد این پارامتر با خطای زیادی همراه است و استفاده از روشی قابل‌اطمینان که قادر به برآورد دقیق توزیع سرعت و در نظر گرفتن اثر رسوبات معلق باشد، بسیار ضروری است. از سوی دیگر، کار با رسوبات معلق، هم در شرایط میدانی و هم در شرایط آزمایشگاهی، همواره با محدودیت‌های زیادی مواجه است. برای نمونه، ایجاد جریان‌های بسیار غلیظ با غلظت زیاد رسوبات معلق در آزمایشگاه امکان‌پذیر نیست. همچنین پمپ‌هایی که توانایی انتقال این جریان‌ها را داشته باشند وجود ندارد. افزون بر این، تهیه رسوبات بسیار ریزدانه و طبیعی که درون کانال‌های آزمایشگاهی به‌صورت معلق انتقال یابند نیز یکی دیگر از محدودیت‌های پژوهشگران است. به‌همین دلیل، بکارگیری مدل‌های عددی، امکان مطالعه دقیق‌تر سازوکارهای انتقال رسوبات معلق را برای پژوهشگران فراهم می‌سازد با پیشرفت علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مطالعه برهم‌کنش‌های پیچیده سیال-رسوب نیز متحول شده‌است و ابزاری قدرتمند برای غلبه بر محدودیت‌های رویکردهای سنتی ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی‌های عددی امکان بررسی دقیق ساختارهای جریان آشفته، تنش‌های برشی بستر و سازوکار پیچیده حاکم بر تعلیق، جذب و ته‌نشینی رسوبات را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها با حل معادلات حاکم بر حرکت سیال و انتقال رسوب، می‌توانند اطلاعات مکانی و زمانی حل‌شده‌ای در مورد توزیع غلظت رسوبات معلق ارائه دهند و درکی جامع‌تر از آنچه تنها بوسیله پژوهش‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید، ایجاد کنند.

آزمایش‌های انجام شده توسط Einstein and Chien (1955) در فلومی به عرض  $30/7$  سانتی‌متر، ارتفاع  $35/7$  سانتی‌متر و طول  $12$  متر انجام شد. این آزمایش‌ها روی بسترهای صاف و زبر و با شیب‌های  $0/0185$  و  $0/025$  انجام شد. ذرات رسوب با قطر  $1/3$ ،  $0/94$  و  $0/274$  میلی‌متر استفاده و غلظت رسوبات با جمع‌آوری نقطه‌ای نمونه‌هایی از جریان از طریق یک لوله تعیین شد. سرعت ورودی به این لوله‌ها برابر با سرعت جریان موضعی در نظر گرفته شد. در هر نقطه نمونه‌برداری،  $3$  تا  $15$  نمونه  $1$  لیتری گرفته شد. در مطالعه حاضر،  $16$  سری از این داده‌ها برای واسنجی مدل‌ها براساس جدول  $1$  انتخاب شد. آزمایش‌ها روی یک بستر صاف و با قطرهای مختلف رسوب ( $1/3$ ،  $0/94$  و  $0/274$  میلی‌متر) انجام شد. جدول  $1$  جزئیات شرایط آزمایشگاهی برای آزمایش‌های Einstein and Chien (1955) را نشان می‌دهد (Umeyama, 1992). آزمایش‌های Vanoni (1946) در یک فلوم چرخشی با عمق  $30/5$  سانتی‌متر، عرض  $84/5$  سانتی‌متر و طول  $18/3$  متر انجام شد. تعداد نقاط اندازه‌گیری بین  $7$  تا  $17$  متغیر بود و  $2$  درصد از عمق جریان تا سطح آب را پوشش می‌داد (جدول  $2$ ).

این مقاله با هدف ارائه یک رویکرد شبیه‌سازی عددی جامع برای پیش‌بینی توزیع سرعت در جریان‌های حاوی رسوبات معلق انجام شده است. در این مطالعه با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی معتبر، ابتدا نتایج مدل عددی Flow-3D واسنجی و صحت‌سنجی می‌شود و پس از اطمینان از عملکرد مدل عددی، غلظت‌های زیاد بار رسوبی معلق در جریان شبیه‌سازی می‌شود. همچنین اثر تغییر در پارامترهایی نظیر قطر، غلظت رسوبات معلق و زبری بستر بر توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق بررسی خواهد شد. یافته‌های این تحقیق نه تنها به درک نظری عمیق‌تر از فرآیندهای انتقال رسوب کمک می‌کند، بلکه ابزاری قوی و کاربردی برای مهندسان و مدیران محیط‌زیست در پیش‌بینی و کاهش چالش‌های مرتبط با رسوبات معلق در محیط‌های آبی مختلف فراهم می‌کند.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق از دو سری داده آزمایشگاهی معتبر که طیف وسیعی از شرایط هیدرولیکی را پوشش می‌دهند استفاده شده است.

جدول ۱- خلاصه داده‌های آزمایشگاهی Einstein and Chien (1955)

| Run No. | Ca (g/lit) | d <sub>50</sub> (mm) | U* (cm/s) | D (mm) | نوع بستر |
|---------|------------|----------------------|-----------|--------|----------|
| ۱       | ۴۴/۴۴      | ۱/۳                  | ۱۱/۴۸     | ۱۳/۷۸  | صاف      |
| ۲       | ۱۶۴/۷۴     | ۱/۳                  | ۱۲/۸۵     | ۱۱/۹۵  | صاف      |
| ۳       | ۲۱۸/۵۲     | ۱/۳                  | ۱۳/۲۷     | ۱۱/۶۴  | صاف      |
| ۴       | ۳۷۳/۰۳     | ۱/۳                  | ۱۴/۲۸     | ۱۱/۵۲  | صاف      |
| ۵       | ۵۸۵/۸۴     | ۱/۳                  | ۱۴/۵      | ۱۰/۹۷  | صاف      |
| ۶       | ۲۱/۵۳      | ۰/۹۴                 | ۱۱/۸۲     | ۱۴/۳   | صاف      |
| ۷       | ۴۸/۴۲      | ۰/۹۴                 | ۱۱/۷۳     | ۱۴/۲۳  | صاف      |
| ۸       | ۵۶/۱۹      | ۰/۹۴                 | ۱۱/۵۴     | ۱۳/۸۷  | صاف      |
| ۹       | ۱۰۹/۴۹     | ۰/۹۴                 | ۱۱/۸۶     | ۱۳/۵۳  | صاف      |
| ۱۰      | ۱۸۳/۳۷     | ۰/۹۴                 | ۱۲/۶      | ۱۳/۰۱  | صاف      |
| ۱۱      | ۲۱         | ۰/۲۷۴                | ۱۰/۵۸     | ۱۳/۲۶  | صاف      |
| ۱۲      | ۱۴۰        | ۰/۲۷۴                | ۱۰/۰۵     | ۱۳/۲   | صاف      |
| ۱۳      | ۲۲۵        | ۰/۲۷۴                | ۱۰/۴۳     | ۱۳/۴۱  | صاف      |
| ۱۴      | ۲۹۵        | ۰/۲۷۴                | ۱۲/۱۷     | ۱۲/۳۱  | صاف      |
| ۱۵      | ۵۱۰        | ۰/۲۷۴                | ۱۲        | ۱۲/۴۴  | صاف      |
| ۱۶      | ۵۲۰        | ۰/۲۷۴                | ۱۲/۴۵     | ۱۱/۸۹  | صاف      |

جدول ۲- خلاصه داده‌های آزمایشگاهی Vanoni (1946)

| Run No. | Ca (g/lit) | d <sub>50</sub> (mm) | U* (cm/s) | D (mm) | نوع بستر |
|---------|------------|----------------------|-----------|--------|----------|
| ۱۷      | ۴/۷۸       | ۰/۱                  | ۴/۱۵      | ۱۴     | زبر      |
| ۱۸      | ۱/۲۹       | ۰/۱                  | ۲/۹۷      | ۷/۲    | زبر      |
| ۱۹      | ۴/۲۷       | ۰/۱                  | ۵/۸۸      | ۲۰     | زبر      |
| ۲۰      | ۳/۴۲       | ۰/۱                  | ۴/۱۵      | ۷/۲    | زبر      |
| ۲۱      | ۶/۷۵       | ۰/۱                  | ۴/۶۹      | ۹      | زبر      |

هستند.  $R_{sos}$  و  $K$  مربوط به نوع سیستم مختصات بوده که در مختصات کارتزین به ترتیب برابر با ۱ و صفر است. همچنین، معادلات حاکم بر رسوب عبارتند از:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \Delta p + F \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_s = -\frac{1}{\rho} \nabla p + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{drift} = \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \nabla p - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (9)$$

در این معادلات،  $\nabla$  عملگر گرادیان،  $p$  فشار سیال،  $t$  زمان،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات رسوب،  $\bar{u}$  سرعت متوسط جریان،  $\bar{p}$  جرم مخصوص متوسط،  $u_s$  مؤلفه سرعت سقوط ذرات رسوب،  $u_{drift}$  مؤلفه سرعت روبه بالای ذرات رسوب،  $F$  نیروهای حجمی وارد بر جریان مانند گرانش یا فشار،  $K$  ضریب مقاومت یا انتقال نیرو براساس خواص محیط و ذرات،  $u_r$  سرعت نسبی رسوب نسبت به سیال،  $f_s$  ضریب تصحیح یا پارامتر اصطکاک ذرات است. در این مدل عددی از مدل‌های آشفتگی مختلفی از جمله طول اختلاط پرانتل، تک‌معدله‌ای،  $k-\epsilon$ ،  $k-\omega$ ، LES و RNG بهره می‌گیرد.

### شرایط مرزی

در مدل سازی عددی با نرم افزار FLOW-3D، شرایط مرزی به شرح زیر تعریف می‌شوند:

- شرط مرزی ورودی: ورود جریان با غلظت اولیه رسوبات معلق مشخص شده مطابق داده‌های آزمایشگاهی.
- شرط مرزی خروجی: فشار ثابت یا عمق آب مشخص، به گونه‌ای که امکان خروج سیال بدون ایجاد برگشت جریان فراهم باشد.
- شرط مرزی دیواره‌ها: سطوح جانبی و کف فلوم به عنوان دیواره‌های صلب.
- شرط سطح آزاد: با استفاده از روش حجم سیال (VOF) شبیه سازی شده و به صورت شرط تغییرپذیر در مدل لحاظ شده است.

تعیین این شرایط مرزی بر اساس مشخصات آزمایشگاهی و متناسب با فیزیک جریان انجام شده است. از شرط مرزی فشار ثابت با عمق جریان مشخص (مطابق با جداول ۱ و ۲) در ورودی، در مرز خروجی از شرط مرزی خروجی، در بستر کانال و دیواره‌ها از شرط مرزی دیوار استفاده شده است. این شرط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار مجازی عمل می‌کند و می‌توان براساس لغزش یا عدم لغزش جریان روی دیواره‌ها مؤلفه سرعت روی دیواره را نیز به برنامه معرفی کرد. در سطح آزاد سیال از شرط مرزی متقارن استفاده شده است که در این

دبی جریان در طول این آزمایش‌ها از ۲۸/۳ تا ۱۵۵/۷ لیتر بر ثانیه متغیر بود. کف فلوم با ذرات شن با قطر متوسط ۰/۴۷ و ۰/۸۸ میلی‌متر پوشیده شده بود. میانگین اندازه ذرات رسوب در جریان برای آزمایش‌های شماره ۱۸-۲۱، ۰/۱ میلی‌متر و برای جریان‌های ۱۸ و ۱۹، شیب فلوم ۰/۰۱۲۵ بود، در حالی که برای جریان‌های ۲۰ و ۲۱، شیب به ۰/۰۲۵ افزایش یافت. عمق آب انتخاب شده برای آزمایش‌های شماره ۱۸ و ۲۰، ۱۴ سانتی‌متر و برای آزمایش‌های شماره ۱۹ و ۲۱، ۷/۲ سانتی‌متر است. مقدار عدد راوس با برازش غلظت‌های اندازه‌گیری شده به دست آمد. در مطالعه حاضر، ۵ سری از این داده‌ها برای واسنجی مدل‌ها انتخاب شد: آزمایش‌های شماره ۱۷ تا ۲۱. این آزمایش‌ها روی یک بستر زبر انجام شده‌اند و آزمایش‌ها را با قطر رسوب ثابت ۰/۱ میلی‌متر پوشش داد. جدول ۲ جزئیات شرایط آزمایشگاهی برای آزمایش‌های (Vanoni (1946) را نشان می‌دهد (Umeyama, 1992).

### مدل عددی مورد استفاده

در این تحقیق از نرم افزار FLOW-3D به عنوان ابزار شبیه سازی عددی استفاده می‌شود. نرم افزار FLOW-3D یک بسته نرم افزاری جامع در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی محسوب می‌شود. این بسته نرم افزاری از تکنیک‌های عددی پیشرفته‌ای برای حل معادلات سه بعدی حرکت سیال برای مسائل چندفازی استفاده می‌کند. آرایش خاصی از گزینه‌های فیزیکی و عددی به کاربر این امکان را می‌دهد تا این نرم افزار را برای طیف وسیعی از جریان سیالات و پدیده‌های انتقال حرارت به کار برد. مدل FLOW-3D شامل الگوهای مختلف فیزیکی است که عبارتند از: آب‌های کم عمق، لزجت، کلویناسیون، آشفتگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل. تحلیل جریان در این نرم افزار با روش حجم محدود و با مش بندی منظم مستطیلی انجام شد. ردیابی سطح آزاد در این نرم افزار با روش حجم سیال VOF است.

معادلات حاکم بر جریان در این مدل عددی عبارتند از:

$$V_F \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{sor}}{\rho} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_x uv}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y \quad (5)$$

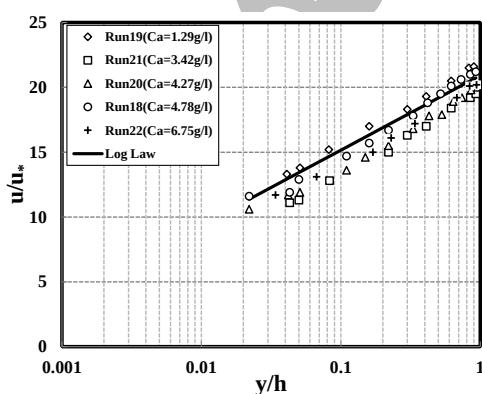
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (6)$$

که در این معادلات،  $V_F$  نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و  $\rho$  جرم مخصوص سیال است.  $u$ ،  $v$  و  $w$  مؤلفه‌های سرعت در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند.  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$

بیشتر و کمتر از مقدار واقعی است و هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، بیانگر اطمینان پذیری مدل عددی است. مقدار RMSE همواره مثبت است و با نزدیک شدن آن به صفر عملکرد مدل مورد بررسی افزایش می یابد. مقدار RMSE خطای برآورد شده را در کل منحنی بیان می کند. شاخص EF مقادیر محاسبه شده را با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه می کند. حداکثر مقدار برای این پارامتر ۱ است. مقادیر منفی بیانگر این است که میانگین مقادیر اندازه گیری شده، برآورد بهتری از مقادیر پیش بینی شده دارد. CRM شاخصی است که نشان دهنده میزبان اختلاف میان مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه گیری شده است. مقادیر منفی بیانگر تمایل مدل در برآورد مقادیر بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده است. CD نشان دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر محاسبه شده به پراکندگی مقادیر اندازه گیری شده است. اگر تمامی مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده با یکدیگر برابر باشند، مقادیر عددی شاخص های RMSE، ME و CRM برابر با صفر و مقدار CD و EF برابر با ۱ خواهد بود.

### نتایج و بحث

در شکل ۳ مقادیر سرعت نسبی  $u/u_*$  در مقابل عمق نسبی  $y/h$  در غلظت های مختلف رسوب برای آزمایش های ونونی در مقیاس نیمه لگاریتمی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، حضور رسوبات معلق در جریان سبب انحراف توزیع لگاریتمی از داده های آزمایشگاهی می شود. میزان تغییرات در ناحیه داخلی بیشتر از ناحیه خارجی است.



شکل ۳- تغییرات سرعت نسبی در حضور رسوبات معلق در مقایسه با توزیع لگاریتمی سرعت

### واسنجی مدل عددی

نوع شرط مرزی، نرم افزار شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می گیرد. به منظور تعیین غلظت رسوب ورودی به کانال از قسمت  $X_{min}$  شرایط مرزی از قسمت sediment غلظت رسوب ورودی (مطابق با جداول ۱ و ۲) مشخص می شود.

در این مطالعه، بستر کانال به صورت صلب فرض شده است و هیچ فرسایش، رسوب گذاری یا تغییر هندسی روی بستر در طول شبیه سازی لحاظ نشده است. این فرض ضمن ساده سازی مدل، امکان تمرکز بر برآورد توزیع سرعت و اثر پارامترهای هیدرولیکی و رسوبات معلق را فراهم می کند.

### شاخص های ارزیابی نتایج مدل عددی

شاخص های ارزیابی مختلفی برای ارزیابی نتایج مدل عددی وجود دارد. شاخص های آماری مورد استفاده در این تحقیق عبارت اند از: خطای متوسط<sup>۱</sup> (AE)، خطای ریشه حداقل مربعات<sup>۲</sup> (RMSE)، ضریب تبیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ )، راندمان مدل<sup>۴</sup> (EF)، ضریب جرم باقیمانده<sup>۵</sup> (CRM) و ضریب تعیین (CD). روابط زیر برای محاسبه هر کدام از این شاخص ها استفاده شده است (Nasrabadi et al., 2013).

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (11)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (12)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

در این روابط،  $P_i$  مقادیر محاسبه شده،  $O_i$  مقادیر اندازه گیری شده،  $n$  تعداد نمونه های برداشت شده و  $\bar{O}$  مقدار متوسط اندازه گیری شده است. مقادیر مثبت و منفی شاخص AE به ترتیب نشان دهنده برآورد

<sup>5</sup> Coefficient of Residual Mass

<sup>1</sup> Average Error

<sup>2</sup> Root Mean Square Error

<sup>3</sup> Determination Coefficient

<sup>4</sup> Modeling Efficiency

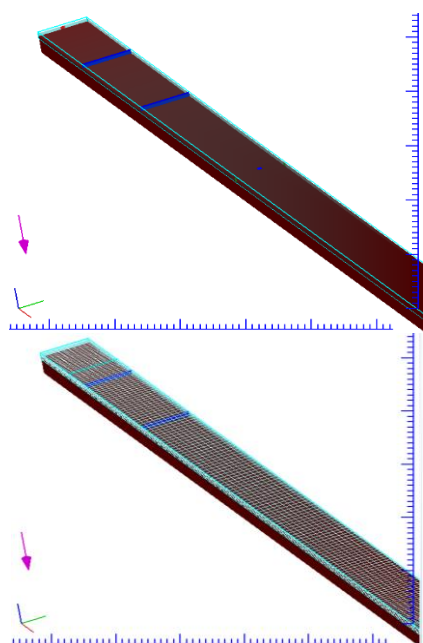


(۵۰۱۱۸) و زمان اجرایی متوسط (۱۱۹۴۰ ثانیه)، دقت مناسبی ارائه دهد.

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل عددی با اندازه‌ها و شبکه‌بندی‌های مختلف

| نوع شبکه‌بندی             | تعداد مش | زمان اجرا (s) | متوسط خطا (%) |
|---------------------------|----------|---------------|---------------|
| ۰/۱۶ m                    | ۳۵۲۶     | ۲۰۰           | ۵۰/۰۲         |
| ۰/۰۸ m                    | ۱۲۱۱۶    | ۶۴۰           | ۱۶/۹۴         |
| ۰/۰۴ m                    | ۶۲۲۵۰    | ۶۰۳۰          | ۵/۲۷          |
| ۰/۰۲ m                    | ۳۱۲۳۴۶   | ۴۵۹۳۵         | ۴/۰۶          |
| ۰/۰۱ m                    | ۲۰۲۵۵۹۰  | ۴۱۸۹۷۰        | ۳/۳۹          |
| غیریکنواخت (۰/۰۸-۰/۰۱۵ m) | ۵۰۱۱۸    | ۱۱۹۴۰         | ۶/۰۲          |

در شکل ۵ مدل هندسی و شبکه مش مورد استفاده در مدل عددی نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل هندسی و شبکه مش مورد استفاده در مدل عددی

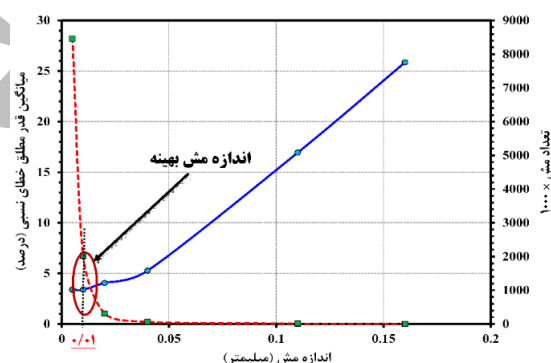
#### تعیین مدل آشفتگی مناسب

به منظور انتخاب مدل آشفتگی برتر از شاخص آماری میانگین قدر مطلق خطای نسبی<sup>۱</sup> (MARE) به صورت معادله زیر استفاده می‌شود:

$$MARE(\%) = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{U_{exp} - U_{sim}}{U_{sim}} \right| \quad (15)$$

در این رابطه،  $U_{exp}$  و  $U_{sim}$  به ترتیب، سرعت جریان در شرایط آزمایشگاهی (اندازه‌گیری شده) و شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، این مدل عددی از مدل‌های آشفتگی مختلفی از

انتخاب مش مناسب برای زمان اجرای برنامه و دقت محاسبات موثر است. هرچه مش ریزتر باشد، دقت و صحت نتایج افزایش می‌یابد اما مدت زمان شبیه‌سازی نیز افزایش یافته و وجود یک سیستم کامپیوتری قدرتمندتر ضروری می‌باشد. به همین منظور، شبیه‌سازی‌ها برای انتخاب مش بهینه، با اندازه مش درشت (۱۶۰ میلی‌متر) شروع شد که منجر به تعداد ۳۵۲۶ مش و میزان خطای بیش از ۵۰ درصد گردید (شکل ۴). در مرحله بعد، اندازه مش به ۱۱۰ میلی‌متر کاهش یافت که سبب افزایش تعداد مش به ۱۲۱۲۰ شد و میزان خطا را نیز به ۱۹/۹ درصد بهبود بخشید. روند یادشده آنقدر ادامه یافت تا در اندازه مش ۱۰ میلی‌متر، کاهش خطای نسبی در مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی متوقف شد. اگر اندازه مش از این مقدار ریزتر در نظر گرفته شود، با وجود افزایش قابل توجه تعداد مش، میزان خطای نسبی تغییری نخواهد کرد. به همین منظور، اندازه مش ۱۰ میلی‌متر به عنوان اندازه مش بهینه برای اجرای مدل عددی در این پژوهش در نظر گرفته شد.



شکل ۴- روند تعیین تعداد مش بهینه برای اجرای مدل عددی

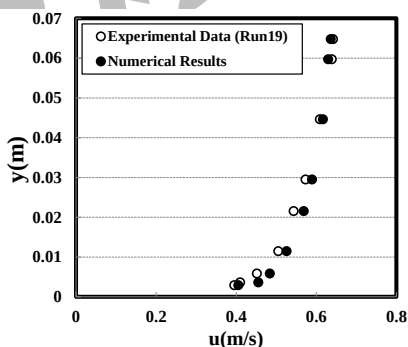
جدول ۳ تأثیر نوع مش و به‌ویژه شبکه‌بندی مش یکنواخت و غیریکنواخت بر نتایج مدل عددی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مش‌های یکنواخت با اندازه‌های بزرگ‌تر (۰/۱۶ و ۰/۰۸ متر) به دلیل درشت بودن شبکه و تعداد کم مش‌ها، دقت قابل قبولی نداشته و درصد خطا به نسبت زیاد است. این اندازه‌های مش به دلیل سادگی دارای زمان شبیه‌سازی کمی هستند ولی نتایج دقیق ارائه نمی‌کنند. با کاهش اندازه مش، میانگین خطا به‌طور مشهود کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش دقت مدل است، اما هزینه زمان محاسبات به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، مش ۰/۰۱ متر کمترین خطای سرعت (۳/۳۹٪) را دارد. همچنین مش غیریکنواخت که ترکیبی از اندازه‌های مختلف مش در دامنه ۰/۰۸ تا ۰/۰۱ متر است، نتوانسته است با تعداد به نسبت کم مش

<sup>1</sup> Mean Absolute Relative Error (MARE)

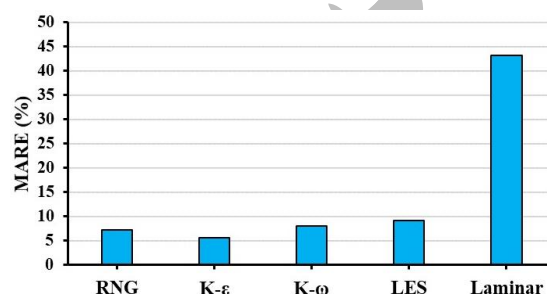
اجراهای ۱۸ تا ۲۱ آزمایش‌های ونونی (۱۹۴۶) به ترتیب برابر با ۵/۸۷، ۳/۹۵، ۱۱/۸۲ و ۲/۸۴ است. به‌طور کلی می‌توان گفت مدل عددی در عمق‌های کم (ناحیه داخلی توزیع سرعت) مقادیر سرعت را بیشتر و در عمق‌های بیشتر (ناحیه خارجی) مقادیر سرعت را کمتر از مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) برآورد می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل عددی FLOW-3D برای برآورد سرعت جریان حاوی رسوبات معلق بسیار بهتر از روابط تجربی است.

همچنین برای مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی با معروف‌ترین و پرکاربردترین رابطه تجربی توسعه‌یافته برای توزیع سرعت (توزیع لگاریتمی سرعت)، مقادیر  $u/u^*$  در مقابل  $y/h$  در مقیاس نیمه-لگاریتمی در شکل ۹ رسم شده است. در این شکل نقاط دایره‌ای توخالی، توپر و خط ممتد به ترتیب بیانگر داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر شبیه‌سازی شده و توزیع لگاریتمی سرعت هستند. در این شکل مشاهده می‌شود که حضور رسوبات معلق سبب انحراف توزیع لگاریتمی از داده‌های آزمایشگاهی می‌شود. میزان تغییرات در ناحیه داخلی بیشتر از ناحیه خارجی است. در این شکل نیز مشهود است که مدل عددی FLOW-3D عملکرد بهتری نسبت به استفاده از توزیع لگاریتمی سرعت دارد.

مطابق با نتایج Nasrabadi et al. (2013) توزیع لگاریتمی تنها قادر به برآورد دقیق سرعت در ناحیه داخلی است. آنها با مقایسه کلیه روابط تجربی توسعه یافته برای توزیع سرعت و بر اساس شاخص‌های آماری به این نتیجه رسیدند که توزیع ویک مقادیر سرعت را در هر دو ناحیه داخلی و خارجی با دقت قابل قبولی و با خطای کلی حدود ۲۰ درصد برآورد می‌کند. حال آنکه مدل عددی FLOW-3D در این پژوهش خطای بسیار کمتری در برآورد توزیع سرعت در جریان حاوی رسوب معلق دارد.

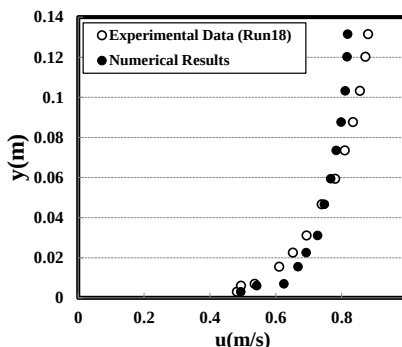


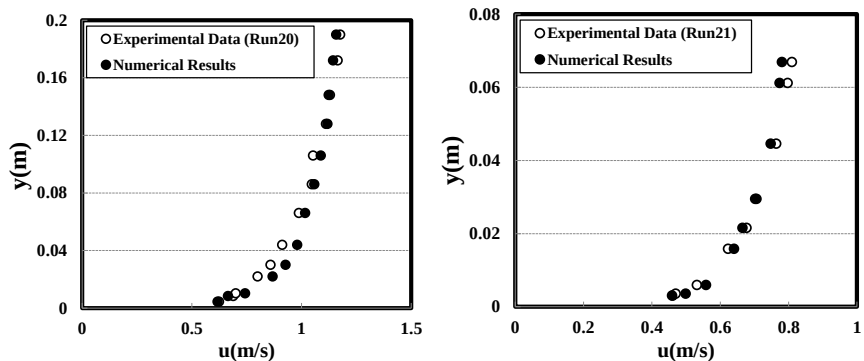
جمله طول اختلاط پراتل، یک‌معادله‌ای،  $k-\omega$ ،  $k-\epsilon$  و LES و RNG بهره می‌گیرد. در این تحقیق، ابتدا مقادیر سرعت و غلظت رسوبات معلق در عمق‌های مختلف با استفاده از ۵ مدل آشفتگی Laminar، LES،  $k-\omega$ ،  $k-\epsilon$  و RNG با استفاده از مدل عددی Flow-3D برای یک سری از داده‌های آزمایشگاهی (Run19) برآورد شد. نتایج نشان داد که حداقل مقدار MARE برای مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  (۶ درصد) و حداکثر مقدار MARE در شرایط استفاده از مدل آشفتگی Laminar (۴۳ درصد) به‌دست آمد. بر همین اساس، مدل  $k-\epsilon$  به‌عنوان مدل آشفتگی در پژوهش حاضر انتخاب شد (شکل ۶).



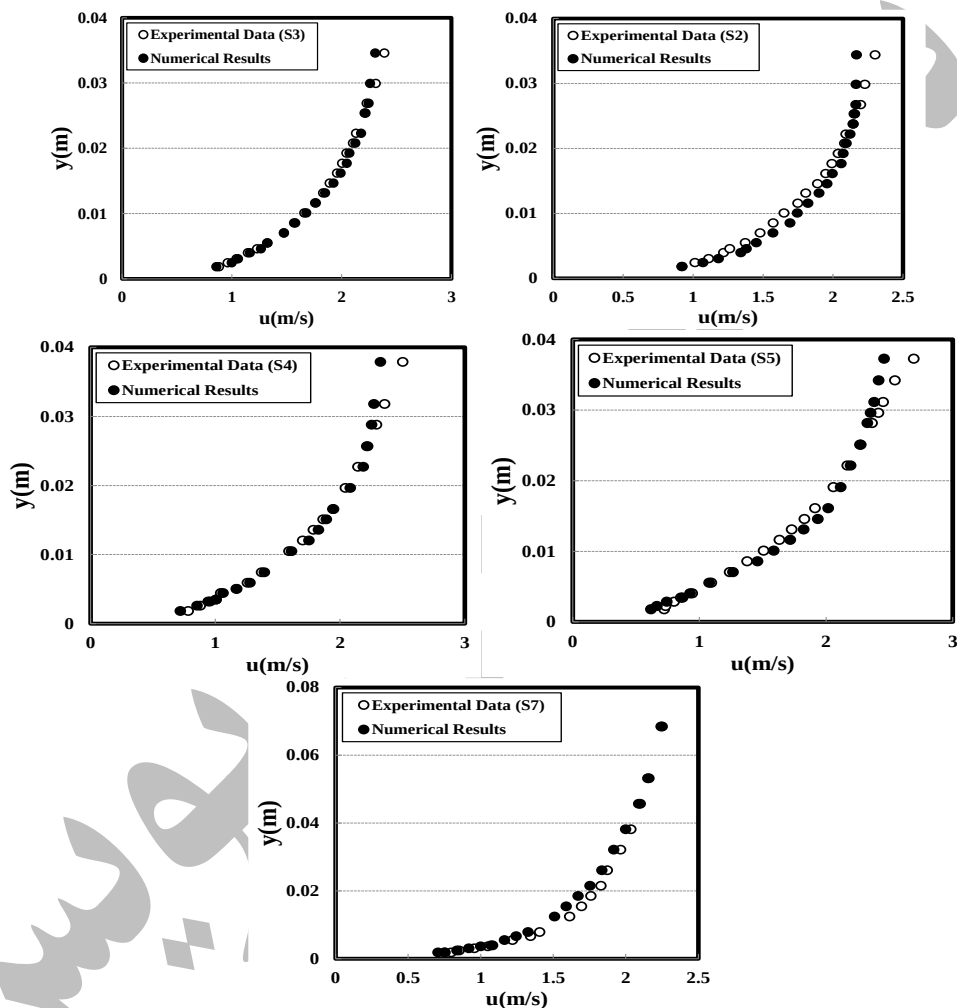
شکل ۶- میانگین قدرمطلق خطای نسبی برای مدل‌های آشفتگی مختلف

پس از اجرای مدل عددی و پایدارشدن روند شبیه‌سازی عددی، مقادیر سرعت در همان اعماق متناظر در داده‌های آزمایشگاهی از مدل عددی استخراج شد. در شکل‌های ۷ و ۸ مقادیر سرعت جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل FLOW-3D در مقابل عمق برای داده‌های آزمایشگاهی مختلف (Vanoni (1946) و Einstein and Chien (1955) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل عددی FLOW-3D دقت قابل قبولی در برآورد مقادیر سرعت در عمق‌های مختلف دارد. درصد خطای مدل عددی FLOW-3D در برآورد مقادیر سرعت در عمق‌های مختلف برای

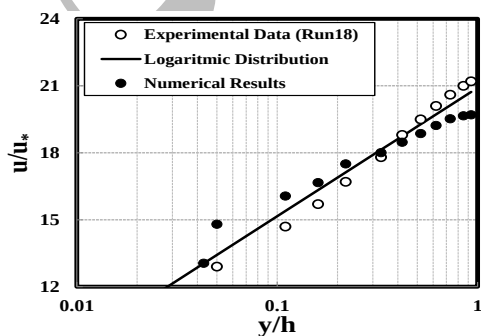




شکل ۷- مقایسه توزیع سرعت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل FLOW-3D (داده‌های آزمایشگاهی (Vanoni (1946)



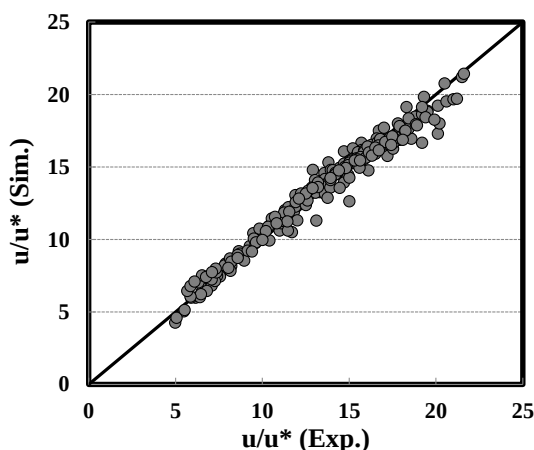
شکل ۸- مقایسه توزیع سرعت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل عددی FLOW-3D (داده‌های آزمایشگاهی (Einstein and Chien (1955)



همان‌طور که در مقدمه نیز بیان شد، قانون لگاریتمی برای کل ناحیه داخلی به جز نزدیک بستر کانال معتبر است، اما در ناحیه خارجی از داده‌های آزمایشگاهی منحرف می‌شود و پژوهشگران مختلف نتیجه‌گیری کردند که قانون لگاریتمی در ناحیه داخلی با مقدار  $0.4$  قابل کاربرد است و زمانی که قانون لگاریتمی به ناحیه خارجی بسط داده شود، مقدار ثابت ون کارمن با تعلیق رسوبات کاهش می‌یابد.

قرار گرفتند، با توجه به اینکه مقدار منفی برای شاخص CRM به‌دست آمده است، می‌توان مشاهده کرد که مدل عددی FLOW-3D تمایل دارد مقادیر سرعت شبیه‌سازی شده را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کند.

در ادامه، در شکل ۱۰ نتایج مدل عددی FLOW-3D در کنار مقادیر آزمایشگاهی ونونی و اینشتین و شن رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود و با توجه به جداول ۴ و ۵، مدل عددی توانایی خوبی در برآورد مقادیر سرعت دارد.

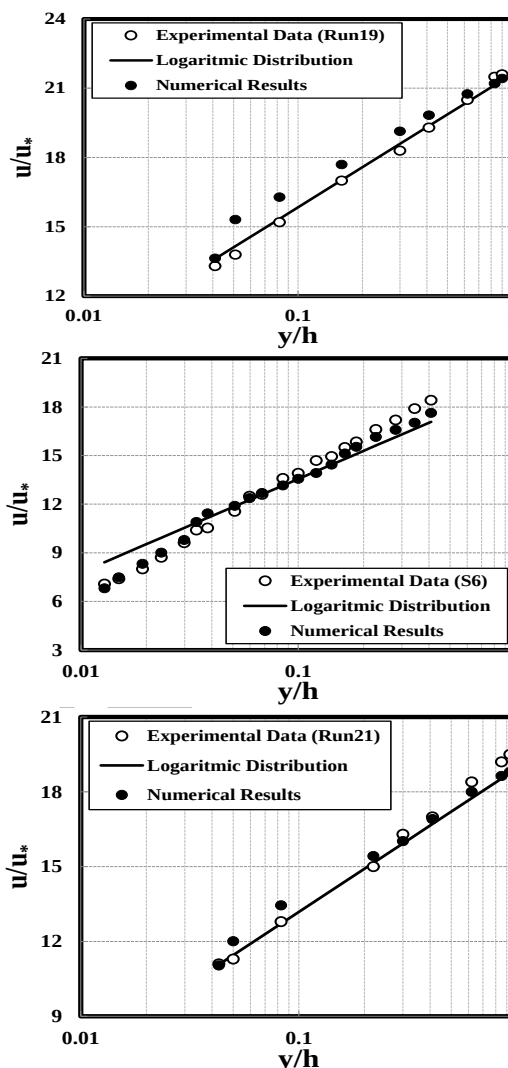


شکل ۱۰- مقایسه مقادیر سرعت شبیه‌سازی شده با مدل عددی FLOW-3D و اندازه‌گیری شده

پس از اطمینان از عملکرد مدل عددی FLOW-3D در برآورد توزیع سرعت جریان حاوی رسوب معلق، اثر پارامترهایی همچون زبری بستر، قطر رسوبات معلق و غلظت اولیه جریان بر توزیع سرعت بررسی می‌شود. هدف از این بخش ایجاد شرایطی است که برقراری آن در آزمایشگاه میسر نیست و استفاده از مدل عددی کمک شایانی در شناخت الگوی جریان حاوی رسوبات معلق می‌کند.

#### زبری بستر

در این بخش با ایجاد مقادیر مختلف ارتفاع زبری (بستر صاف و ارتفاع‌های زبری ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) توزیع‌های سرعت و غلظت در اعماق مختلف توسط مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی شد.



شکل ۹- مقایسه توزیع سرعت آزمایشگاهی، توزیع لگاریتمی و نتایج مدل عددی FLOW-3D

همچنین برای بررسی دقیق‌تر و تحلیل نتایج مدل عددی به‌صورت آماری، نتایج تحلیل آماری حاصل از مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در جداول بالا مشاهده می‌شود، میزان خطای متوسط مدل عددی در برآورد مقادیر توزیع سرعت برای داده‌های ونونی (۱۹۴۶) ۶/۱۲ درصد و برای داده‌های اینشتین و شن ۳/۷۵ می‌باشد. همچنین برای کلیه شاخص‌های آماری که مبنای ارزیابی

جدول ۴- تحلیل آماری نتایج شبیه‌سازی توزیع سرعت توسط مدل عددی FLOW-3D (داده‌های آزمایشگاهی ونونی)

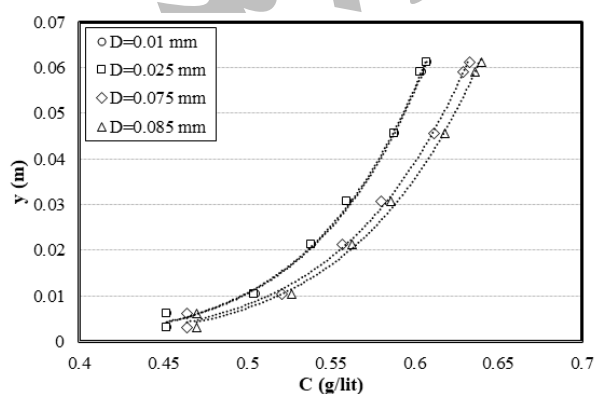
| شماره آزمایش | CRM      | EF     | R <sup>2</sup> | CV    | RMSE   | AE     | درصد خطا |
|--------------|----------|--------|----------------|-------|--------|--------|----------|
| Run18        | -۰/۰۰۵۲۷ | ۰/۴۵۸۷ | ۰/۵۴۱۲         | ۲۴/۴۴ | ۰/۰۴۲۶ | ۰/۲۳۲۱ | ۵/۸۷     |
| Run19        | -۰/۰۲۹۹۷ | ۰/۲۰۴۳ | ۰/۷۹۵۶         | ۲۴/۶۲ | ۰/۰۲۲۷ | ۰/۰۸۵۳ | ۳/۹۵     |
| Run20        | -۰/۰۲۰۹۳ | ۰/۰۵۶۳ | ۰/۹۴۳۶         | ۱۷/۳۱ | ۰/۰۳۸۷ | ۰/۲۰۱۸ | ۱۱/۸۲    |
| Run21        | ۰/۰۰۲۱۲  | ۰/۲۳۳۵ | ۰/۷۶۶۴         | ۱۹/۴۶ | ۰/۰۲۰۳ | ۰/۰۸۰۱ | ۲/۸۴     |
| AVR          | -۰/۰۱۳۵۱ | ۰/۲۳۸۲ | ۰/۷۶۱۷         | ۲۱/۴۶ | ۰/۰۳۱۱ | ۰/۱۴۹۸ | ۶/۱۲     |

جدول ۵- تحلیل آماری نتایج شبیه‌سازی توزیع سرعت توسط مدل عددی FLOW-3D (داده‌های آزمایشگاهی اینشتین و شن)

| شماره آزمایش | CRM     | EF     | R <sup>2</sup> | CV    | RMSE   | AE    | درصد خطا |
|--------------|---------|--------|----------------|-------|--------|-------|----------|
| S1           | -۰/۰۳۳۵ | ۰/۹۸   | ۰/۰۱۹          | ۱۳/۶۶ | ۰/۰۶۷۹ | ۰/۳۸۹ | ۳/۸۳     |
| S2           | -۰/۰۲۴۸ | ۰/۰۶۶  | ۰/۹۳۳          | ۷/۳۶  | ۰/۰۷۵۶ | ۰/۷۱  | ۴/۰۹     |
| S3           | -۰/۰۰۶۳ | ۰/۰۲۲  | ۰/۹۷۷          | ۸/۹۵  | ۰/۰۳۲۶ | ۰/۲۸۲ | ۱/۶      |
| S4           | -۰/۰۰۳۸ | ۰/۰۳۵  | ۰/۹۶۴          | ۱۰/۵  | ۰/۰۵۴۲ | ۰/۳۵۲ | ۲/۲۵     |
| S5           | -۰/۰۰۳۲ | ۰/۰۳۲  | ۰/۹۶۷          | ۱۴/۷۱ | ۰/۰۸۶۷ | ۰/۷۳۸ | ۴/۵۷     |
| S6           | ۰/۰۱۲۲  | ۰/۱۷۹  | ۰/۸۲           | ۱۴/۱۹ | ۰/۰۵۸۲ | ۰/۵۰۷ | ۳/۳۲     |
| S7           | ۰/۰۳۲۴  | -۰/۰۱۸ | ۰/۰۱           | ۱۳/۸۷ | ۰/۰۵۹۶ | ۰/۴۷۶ | ۳/۶۴     |
| S8           | -۰/۰۰۱  | ۰/۱۴۹  | ۰/۸۵           | ۱۴/۷۳ | ۰/۰۶۱۷ | ۰/۴۷۵ | ۳/۷۸     |
| S9           | -۰/۰۰۰۸ | ۰/۲۱   | ۰/۷۸۹          | ۱۵/۲۱ | ۰/۰۷۵۶ | ۰/۵۴۴ | ۴/۶۳     |
| S10          | -۰/۰۱۲۱ | ۰/۲۱۴  | ۰/۷۸۵          | ۱۶/۷  | ۰/۰۸۰۳ | ۰/۵۷۵ | ۵/۷۹     |
| AVR          | -۰/۰۰۲۷ | ۰/۱۸۷  | ۰/۸۱۲          | ۱۳    | ۰/۰۶۵۳ | ۰/۵۰۵ | ۳/۷۵     |

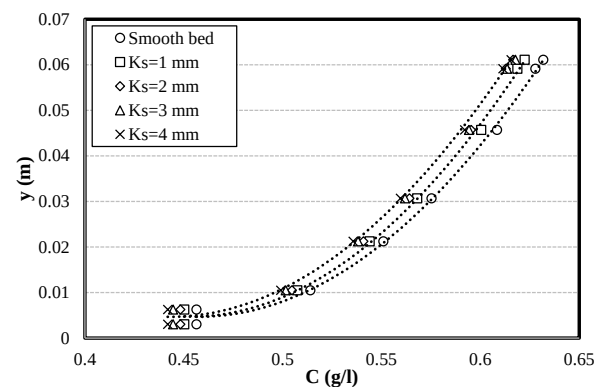
### قطر رسوبات

یکی از پارامترهای مهم در جریان حاوی رسوبات معلق، قطر رسوبات است. با توجه به اینکه انجام آزمایشات با قطرهای بسیار ریزدانه معلق در آزمایشگاه به راحتی میسر نیست، این موضوع توسط مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی شده است. در شکل ۱۲ نتایج شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق با قطرهای مختلف بسیار ریزدانه (۰/۰۱ تا ۰/۰۸۵ میلی‌متر) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر رسوبات معلق، میزان سرعت جریان تا حدودی (۴ درصد) افزایش یافته است.



شکل ۱۲- شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق با قطرهای مختلف

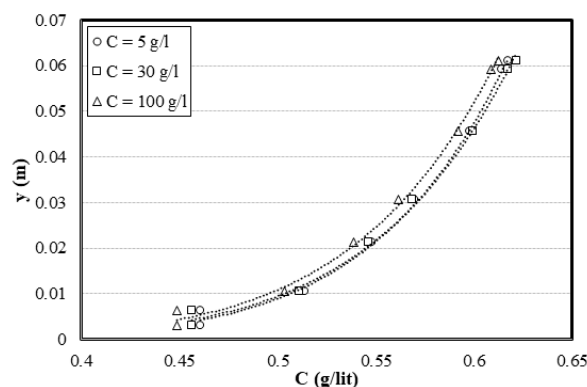
در شکل ۱۱ توزیع سرعت جریان به‌ازای زبری‌های مختلف نشان داده شده است. با افزایش زبری جریان، تنش برشی روند افزایشی دارد و به نوعی مقاومت در مقابل جریان افزایش می‌یابد. میانگین کاهش سرعت جریان در بستر با ارتفاع زبری ۴ میلی‌متر نسبت به بستر صاف حدود ۳ درصد بوده است. همان طور که مشاهده می‌شود روند کاهش سرعت جریان با افزایش ارتفاع زبری بستر به‌خوبی توسط مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی شده است. میانگین کاهش سرعت جریان در بستر با ارتفاع زبری ۴ میلی‌متر نسبت به بستر صاف حدود ۳ درصد بوده است.



شکل ۱۱- شبیه‌سازی توزیع سرعت روی بسترهای با ارتفاع زبری مختلف

### اثر غلظت رسوبات معلق

یکی دیگر از پارامترهای مهم در جریان حاوی رسوبات معلق که ایجاد آن با غلظت‌های زیاد در آزمایشگاه به‌سختی امکان‌پذیر است، غلظت رسوبات می‌باشد. در شکل ۱۳ توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق با غلظت‌های مختلف (۵ تا ۱۰۰ گرم در لیتر) شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت رسوبات معلق میزان سرعت جریان تغییر مشهود و قابل تفسیری نداشته است.



شکل ۱۳- شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان حاوی رسوبات معلق با غلظت‌های مختلف

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، به‌منظور شبیه‌سازی عددی توزیع غلظت و سرعت جریان حاوی رسوبات معلق از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. برای این هدف از معتبرترین داده‌های آزمایشگاهی قابل دسترس (داده‌های آزمایشگاهی ونونی و اینشتین و شن برای صحت سنجی نتایج مدل عددی استفاده گردید. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- با بررسی مقادیر آزمایشگاهی سرعت نسبی  $u/u^*$  در مقابل عمق نسبی  $y/h$  در غلظت‌های مختلف رسوب در مقیاس نیمه‌لگاریتمی مشاهده شد که حضور رسوبات معلق در جریان سبب انحراف توزیع لگاریتمی از داده‌های آزمایشگاهی می‌شود. میزان تغییرات در ناحیه داخلی بیشتر از ناحیه خارجی است.
- در این پژوهش پس از اجرای مدل عددی با اندازه‌های مش مختلف، اندازه مش ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان اندازه مش بهینه برای اجرای مدل عددی در نظر گرفته شد و مدل K-ε نیز به‌عنوان مدل آشفتگی انتخاب گردید.
- نتایج نشان داد که مدل عددی FLOW-3D دقت قابل‌قبولی در برآورد مقادیر سرعت در عمق‌های مختلف دارد. میزان خطای متوسط مدل عددی در برآورد مقادیر توزیع سرعت برای داده‌های ونونی ۶/۱۲ درصد و برای داده‌های اینشتین و شن

### تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

### دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

### مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها یا انجام مراحل شبیه‌سازی عددی

نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، انجام تحلیل آماری، ویرایش و بازبینی مقاله

نویسنده سوم: راهنمایی، کنترل نتایج، ویرایش و بازبینی متن مقاله

### اصول اخلاقی

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

### منابع

- Cioffi, F. and Gallerano, F., 1991. Velocity and concentration profiles of solid particles in a channel with movable and erodible bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(3), pp.387-401. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:3(387).
- Coleman, N.L., 1986. Effects of suspended sediment on the open-channel velocity distribution. *Water Resources Research*, 22(10), pp. 1377-1384. doi: 10.1029/WR022i010p01377.
- Einstein, H.A. and Chien, N., 1955. Effects of heavy sediment concentration near the bed on the velocity and sediment distribution. Report No. 8, U.S. Army Corps

Standards, 21, pp. 707–741.  
<https://doi.org/10.6028/jres.021.039>

Coles, D., 1956. The law of the wake in the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1, pp.191–226. <https://doi.org/10.1017/S0022112056000135>

Guo, J. and Julien, P.Y., 2008. Application of the Modified Log-Wake Law in Open-Channels. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 1(2), pp. 17-23.

Schlichting, H., 1979. *Boundary Layer Theory*. New York: McGraw-Hill. 814p.

Nordin, C.F. and Dempster, G.R., 1963. Vertical distribution of velocity and suspended sediment, Middle Rio Grande, New Mexico. U.S. Geological Survey Professional Paper 462-B, 21 pp.

Patel, P. and Sarkar, A., 2023. Entropic velocity distribution for sediment-laden flows with a modified dip estimation model at data-scarce river sites. *Hydrological Sciences Journal*, 69(6), pp. 746–764.

Vanoni, V.A. and Nomicos, G.N., 1960. Resistance properties of sediment-laden streams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 125(1), pp. 1140–1175.

Yang, S. Q., Tan, S. K., and Lim, S. Y., 2004. Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform open channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(12), pp. 1179–1186.

of Engineers, Missouri River Division, University of California.

Elata, C. and Ippen, A.T., 1961. The dynamics of open channel flow with suspensions of neutrally buoyant particles. Technical Report No. 45, Hydrodynamics Lab, MIT.

Parker, G. and Coleman, N.L., 1986. Simple model of sediment-laden flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(5), pp.356–375. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:5(356).

Tsai, C.H. and Tsai, C.T., 2000. Velocity and concentration distributions of sediment-laden open channel flow. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(5), pp. 1075–1086. doi: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb04299.x.

Umeyama, M. 1992. Vertical distribution of suspended sediment in uniform open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(6), pp. 936–941. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:6(936).

Umeyama, M., 1999. Velocity and concentration fields in uniform flow with coarse sands. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(6), pp.653–656. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:6(653).

Van Rijn, L.C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Netherlands: Aqua Publications.

Vanoni, V.A., 1946. Transportation of Suspended Sediment by Water. *Transactions of the ASCE*, 111, pp. 67–133. doi: 10.1061/TACEAT.0005975

Yu, K., Yoon, B. and Kim, D., 2014. Re-evaluation of change of mean velocity profiles in turbulent open-channel flows due to introducing sediment particles. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(7), pp. 2261–2267. doi:10.1007/s12205-014-0055-8. doi: 10.1007/s12205-014-0055-8.

Omid, M.H. and Nasrabadi, M. 2012. Sedimentation Engineering. Chapter 2. *University of Tehran Press*. 798p. (in Persian).

Nasrabadi, M., Riahi, S. and Eslahi, N., 2012. Investigation of velocity distribution in flow containing suspended sediments. *9th International Seminar on River Engineering*, February 2012, Ahvaz, Shahid Chamran University. (in Persian).

Nasrabadi, M., Riahi, S. and Samadi Borujeni, H., 2013. Evaluation of equations for distribution of suspended sediment concentration in open channels. *Journal of Iranian Water Research*, 8(14), pp. 175–185. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.377078.669846> (in Persian).

Binesh, N. and Bonakdari, H., 2016. Presentation of a one-dimensional model for estimating velocity distribution in a narrow open channel. *Modares Scientific and Research Journal of Civil Engineering*, 16(5). <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-12124-en.html> (in Persian).

Jafari, F., Abbaspour, A. and Hosseinzadeh Dalir, A., 2016. Numerical investigation of velocity profiles in open channels with rough bed. *Journal of Soil and Water Science*, 26(1), pp. 81–93.

Keulegan, G.H., 1938. Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research, National Bureau of*