

## Developed Three-dimensional Model for Extract Stage-Discharge Relationship in Straight Multi-stage Compound Channels

#### Majid Rostami<sup>1</sup>, Ramin Amini<sup>2</sup>, Abdolreza Zahiri<sup>3\*</sup>

1- PhD Student, Department of civil Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Shahroud University

2- Associate Prof, Civil Engineering Department, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Shahroud University

3- Associate Prof, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

#### Abstract

Introduction: In natural rivers and certain urban channels, when flood events occur, the flow diverts from the main channel and inundates the surrounding floodplains. These particular configurations are termed compound channels. Floodplains can exhibit both symmetrical and asymmetrical patterns. Depending on geometric factors, lateral slope, and differences in elevation, multiple floodplains can manifest on each side of the main channel. These intricate structures are known as multi-stage compound channels. Multi-stage compound channels not only possess enhanced flow conveyance capabilities compared to simpler classic compound channels but also their second or third floodplains may offer prospects for recreational utilization or landscape enhancement within urban settings. Historically, the examination of flow parameters and the computation of conveyance capacities for compound sections were carried out using conventional methodologies, such as divided channel methods and traditional flow resistance equations like Manning, Chezy, Darcy-Weisbach, and others. However, these approaches often disregarded the momentum exchange arising from interactions between the main channel and floodplains, as well as the impact of secondary flows. Consequently, the estimated flow rates for compound sections tended to be higher than actual values. Sellin (1964) played a pioneering role in acknowledging the interaction between the main channel and floodplains, laying the groundwork for subsequent investigations into the evolution of conventional techniques. In contrast to the extensive research on classic compound channels, multi-stage compound channels have received limited attention and exploration in the scientific literature.

**Methodology:** In this research, a numerical solution of the Navier-Stokes equations using the finite volume method and The RNG k- $\epsilon$  turbulence model has been employed to simulate various hydraulic characteristics of multi-stage compound channels. These characteristics encompass the three-dimensional flow pattern, distribution of transverse velocity, secondary flows, turbulence energy, and the stage-discharge relationship. The RNG k- $\epsilon$  turbulence model is adept at reproducing rotational flows and large vortices, addressing the limitations of the standard k- $\epsilon$  model in representing non-circular channels at corner locations and rotational flows.

To verify the validity of this mathematical model, laboratory data obtained from a channel with a three-stage asymmetric rectangular compound section (Singh, 2021) were utilized. The experimentation carried out in a channel featuring a main section width of 0.445 meters. On

#### Developed Three-dimensional Model for Extract ...

one side of the main section, two floodplains of widths 10 and 20 centimeters were established. The bed of the main channel was constructed using glass, while the bed of the first and second floodplains were covered with a uniform layer of synthetic grass to introduce channel roughness. The channel itself is 20 meters in length, with a longitudinal slope of 0.003. The total height and width of the channel are 0.5 and 0.745 meters, respectively. The bankfull height is set at 0.0425 meters. The flow rate within this channel varies between 20 and 60 liters per second.

**Results and Discussion:** Overall, the comparison of the three-dimensional model's computational results with experimental data in terms of the positions and values of maximum and minimum velocities indicates the satisfactory accuracy of the proposed mathematical model in this study.

The turbulence intensity and momentum exchange at the interface between the first and second floodplains are lower compared to the interface between the main channel and the first floodplain. This discrepancy is attributed to the greater velocity difference at the interface plane of the main channel and the first floodplain. The influence of secondary currents at the main channel and first floodplain interface diminishes as the water level rises. However, significant secondary currents persist at the boundary between the first and second floodplains across all investigated relative depths. This underscores the significance of flow dispersion in contrast to convection in the second floodplain, particularly in cases of shallow relative depths. The highest flow velocity is observed at the midpoint of the main channel, inclined toward its right wall, situated far from the channel bed and close to the water surface. The computed transverse profiles of stream-wise velocity are satisfactorily accurate in both the main channel and floodplains (especially the second floodplain). Nevertheless, the modeling error is relatively notable at the interface of the main channel and the first floodplain. Predicting flow discharge for this channel using the mathematical model yields an average error of approximately 3.9% and a maximum error of 6.2%.

**Conclusion:** Due to the lack of experimental data on height and width variations of the second floodplain and their impact on flow characteristics, expressing the effects of these conditions is challenging. Further research involving precise laboratory measurements is required to comprehensively understand the influence of these changes.

Considering that one of the applications of multi-stage compound channel is in urban areas and the first floodplain has a smaller width and is designed with the aim of increasing the channel conveyance capacity, and the second floodplain is intended to beautify the urban landscape and use it as a recreational and tourism environment. Therefore, it usually has tree vegetation. In addition to creating high shear stresses in the bed of the second floodplain, this causes high energy loss and a significant decrease in the conveyance capacity of the multistage compound channel. Therefore, it is recommended to design rivers or manmade flood control channels in the urban areas in the form of multi-stage compound channels so that the first floodplain is to be significantly increase the conveyance capacity of the channel and the second floodplain is for urban and public landscapes. This provides nearby people to escape from the danger zone during severe urban floods.

**Keywords:** finite volume method, quick method, RNG K-ε, multi-stage compound channel, stage-discharge relationship.

انجمن هیدرولیک ایران نشریه هیدرولیک



مقاله پژوهشی /https://doi.org

# مدل سهبعدی توسعه داده شده برای استخراج رابطه دبی-اشل در مقاطع مرکب چندسیلابدشتی مستقیم

مجید رستمی<sup>۱</sup>، رامین امینی<sup>۲</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه¬های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی شاهرود ۲- دانشیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده: در زمان سیلاب معمولاً مقطع اصلی رودخانه پر شده و آب وارد دشتهای سیلابی میشود. در این شرایط رودخانه به شکل مقطع مرکب ظاهر میشود. بعضی از رودخانهها بر حسب شرایط هندسی و ارتفاعی ممکن است بیش از یک دشت سیلاب در طرفین مقطع اصلی داشته باشند که به این مقاطع، کانال مرکب چندسیلابدشتی گفته میشود. این کانالها ظرفیت انتقال دبی جریان بیشتری از کانالهای ساده و مرکب دارند و سیلابدشتهای دوم یا سوم آنها در مناطق شهری میتوانند به عنوان مناطق تفریحی برای زیباسازی منظر مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله با استفاده از توسعه یک مدل سهبعدی در محیط برنامه C به کمک حل عددی معادلات ناویراستوکس به روش حجم محدود و الگوی کوییک، جنبههای هیدرولیکی متفاوتی از این مقاطع شامل الگوی سهبعدی جریان، توزیع عرضی سرعت، جریانهای ثانویه، انرژی آشفتگی و نیز رابطه دبی-اشل مدل سازی شده است. برای واسنجی این مدل ریاضی از دادههای آزمایشگاهی Singh جریانهای ثانویه، انرژی آشفتگی و نیز رابطه دبی-اشل مدل سازی شده است. برای واسنجی این مدل ریاضی از دادههای آزمایشگاهی Singh داد که در هر دو حالت، حداکثر سرعت جریان در میانه مقطع اصلی و متمایل به جداره سمت راست آن، در فاصلهای دورتر از کف کانال و نادی که در هر دو حالت، حداکثر سرعت جریان در میانه مقطع اصلی و متمایل به جداره سمت راست آن، در فاصلهای دورتر از کف کانال و نزدیک به سطح آب رخ داده است. دقت نتایج محاسباتی پروفیل عرضی مولفه سرعت در جهت جریان در مقطع اصلی و سیلابدشتها (به ویژه سیلابدشت دوم) قابل قبول است، اما در محدوده مرز تماس مقطع اصلی با سیلابدشت اول خطای مدل سازی نسبتاً زیاد است. رابطه دبی-اشل این کانال به کمک مدل ریاضی دارای خطای متوسط حدود ۳/۳ درصد و حداکثر خطای ۲/۶ درصد می-باشد.

**کلید واژگان**: روش حجم محدود، روش کوئیک، RNG K-٤، مقطع مرکب چند سیلابدشتی، رابطه دبی-اشل.

#### ۱– مقدمه

در رودخانههای طبیعی و برخی کانالهای درون شهری در مواقع سیلاب، جریان با خروج از کانال اصلی وارد سیلابدشتها میگردد که به این مقاطع، کانالهای مرکب میگویند. سیلابدشتها میتوانند به صورت متقارن یا نامتقارن باشند. در هر طرف کانال اصلی بر حسب شرایط هندسی، شیب جانبی و اختلاف ارتفاع ممکن است چند سیلابدشت شکل بگیرد که به این مقاطع، کانال مرکب چندسیلابدشتی گفته میشود (شکل ۱). کانالهای مرکب چندسیلابدشتی ضمن دارا بودن ظرفیت انتقال دبی جریان بیشتر از کانالهای ساده و مرکب کلاسیک، سیلابدشتهای دوم یا سوم آنها در مناطق شهری میتوانند به عنوان مناطق

تفریحی یا برای زیباسازی منظر مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۲ دو نمونه از رودخانههای طبیعی چندسیلابدشتی نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در زمان وقوع سیلابهای شدید، بسیاری از رودخانهها سیلگیر شده و آب وارد چندین دشت سیلابی آنها در هر طرف از کنارهها می شود، پیچیدگی محاسبات سرعت متوسط و نیز دبی جریان در این مقاطع بسیار دشوار می شود. در این حالت، در هر طرف از ساحل رودخانه، دو مکانیسم مختلف قابل مشاهده خواهد بود: اثر متقابل جریان بین مجرای اصلی و دشت سیلابی اول، و اثر متقابل بین دشتهای سیلابی اول و دوم. در این خصوص و اینکه هر



Fig.2 Multi-stage compound natural rivers. A: Yara river in Melbourne, Australia, B: Arakawa river in Tokyo, Japan شكل ٢ رودخانه هاى مركب چندسيلابدشتى. A: رودخانه يارا در ملبورن استراليا، B: رودخانه آراكاوا در توكيو ژاپ

کدام از این دو مکانیسم از نظر کمی چه تاثیری بر کاهش دبی کل جریان (دبی سیلاب) و افزایش اصطکاک در مرزهای تماس (تنش برشی) می گذارند، یافتههای محققین محدود بوده است.

بررسی پارامترهای جریان و تخمین ظرفیت انتقال مقاطع مرکب در گذشته با روشهای سنتی مانند تجزیه مقطع مرکب و با استفاده از روابط مرسوم مقاومت جریان مثل مانینگ، شزی، دارسی-ویسباخ و … انجام می گرفت که به دلیل صرفنظر کردن از انتقال مومنتوم ناشی از اندرکنش بین کانال اصلی و سیلابدشتها و نیز اثر جریانهای ثانویه، دبی مقاطع مرکب بیشتر از مقدار واقعی برآورد می شد. اولین بار (Selin (1964) به وجود اندرکنش بین کانال اصلی و سیلابدشتها پیبرد و نظریه او پایه گذار تحقیقات محققین مختلف در توسعه روشهای سنتی با در نظر گرفتن اثر متقابل جریان بین مجرای اصلی و سیلابدشتها یا اصلاح آنها با ضرائب تجربی گردید

(Lambert and Sellin 1996)

مهمترین پارامتر هیدرولیکی که نقش موثری در تحلیل جریان در مقاطع مرکب دارد، عمق نسبی (Dr) است. در کانالهای مرکب کلاسیک (تک سیلابدشتی)، عمق نسبی به صورت نسبت عمق جریان در دشتهای سیلابی (H-h) به عمق جریان در مقطع اصلی (یا عمق کل جریان، H) تعریف می سود. این پارامتر در کانالهای مرکب چند سیلابدشتی به صورت نسبت عمق جریان در سیلابدشت دوم (H-h) به عمق کل جریان بیان می گردد (شکل ۱):

$$Dr = \frac{H-h}{H}$$
(1)

#### ۲- مروری بر مطالعات گذشته

روشهای تحلیل جریان در کانالهای مرکب را میتوان به سه دسته متفاوت شامل روشهای هوش مصنوعی یا یادگیری ماشین، روشهای آماری و روشهای هیدرولیکی

دوره ؟؟، شماره ؟، ؟؟؟؟ ؟؟؟؟

تقسيم نمود (Chen et al. 2019).

۲-۱- روش های هوش مصنوعی امروزه روش های هوش مصنوعی مانند شبکههای عصبه، برنامهریزی بیان ژن، ماشینهای بردار پشتیبان و ... کاربرد گستردهای در تمامی مباحث مهندسی آب از جمله تحلیل جریان در مقاطع مرکب دارند. این مدلها دارای فرآیندی داده محور بوده و نیازمند دادههای آماری زیادی هستند. تاكنون روشهای هوش مصنوعی متفاوتی برای مقاطع مرکب کلاسیک و تک سیلابدشتی به کار گرفته شدهاند (Unal et al. 2010, Sahu et al. 2011, Azamathulla and Zahiri 2012, Zahiri and Azamathulla 2014, Najafzadeh and Zahiri 2015, Parsaei and Haghiabi 2015, Parsaie and Haghiabi 2017, Chen et al. 2019) ، اما برای مقاطع مرکب چند سیلابدشتی مطالعهای انجام نشده است. دلیل این امر احتمالاً عدم وجود دادههای هیدرولیکی کافی از مقاطع مرکب چندسیلابدشتی مىباشد.

#### ۲-۲- روشهای آماری

روشهای آماری مانند MVRM ، MARS و... ضرائب رگرسیونی مجهولی را ارائه می کنند که باید با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه واسنجی شوند. این روشها عموماً فقط برای هندسههایی مشابه با مقاطع واسنجی شده کاربرد دارند و نمی توان آنها را برای هندسههای متفاوت بدون واسنجی مجدد بکار گرفت. این محدودیت اساسی کاربرد این روشها را محدود کرده است ( Al-Khatib et). (al. 2014, Parsaie and Haghiabi 2017)

#### ۲-۳- روشهای هیدرولیکی

روشهای هیدرولیکی را میتوان به صورت یک، دو و سه بعدی بررسی نمود. مدلهای یکبعدی فراوانی وجود دارند که دقت مناسبی در تخمین دبی جریان در مقاطع مرکب داشتهاند. از جمله بهترین روشها در این زمینه میتوان به مدل کوهیرنس (Ackers, 1993) و تبادل دبی ( Bousmar مدل کوهیرنس (and Zech, 1999) و تبادل دبی برآورد میکنند جریان در مقطع مرکب را با دقت مناسبی برآورد میکنند اما اغلب آنها در تخمین دبی تفکیکی جریان در مقطع اصلی و دشتهای سیلابی ضعف دارند. علاوه بر این، قادر به حل جنبههای مهمی از هیدرولیک جریان مثل توزیع

عرضی (و عمقی) سرعت و نیز تنش برشی مرزی نیستند. برای رفع این محدودیت و به منظور مدل سازی جزئیات بیشتری از هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب، Ackers (1991) و Lambert and Sellin (1996) استفاده از مدلهای آشفتگی را برای رسیدن به نتایج بهتر پیشنهاد نمودند. مدل های آشفتگی را به دو صورت می توان در حل معادلات جریان بکار برد. راه حل اول، استفاده از مدل های شبهدوبعدی و راهحل دوم، استفاده از مدلهای دوبعدی و سهبعدی است. مدلهای دو و سهبعدی از نظر معادلات حاکم و روشهای حل، پیچیدهتر از مدلهای یکبعدی و شبهدوبعدی بوده و به حافظه محاسباتی بزرگتر و نیز مدت زمان اجرای بسیار بیشتری نیاز دارند. برای بهینه کردن این فرایند، محققین بسیاری به توسیعه مدلهای شبهدوبعدی اقدام نمودند. Vreughdenhil and Wijbenga (1982) اولین افرادی هستند که از یک مدل آشفتگی ساده برای نمایش اثر متقابل بین کانال اصلے و سیلابدشتها بر توزیع عرضی سرعت استفاده کردند. آنها با استفاده از یک معادله دینامیکی متوسط عمقی، توزیع عرضی سرعت را با استفاده از مقادیر مختلف لزجت گردابهای اصلاح نمودند. با توجه به اینکه لزجت گردابهای وابستگی شدیدی به خصوصیات هیدرولیکی و تلاطمی جریان دارد، آنها اعلام کردند که دانش کنونی برای تعیین مقدار مناسب این ضریب کافی نیست. (I985) Samuels برای رفع این محدودیت از رابطه انیشــتین برای تعیین لزجت گردابهای استفاده نمود:

$$v_t = \lambda u_* z$$

که  $v_t$  ضریب لزجت گردابهایی،  $u_*$  سرعت برشی، z عمق جریان و  $\lambda$  ضریب بی بعد لزجت گردابهای است. Shiono (1991) and Knight بی اساس معادلات ناویر – استوکس و با فرض جریان ماندگار و یکنواخت و با اعمال آشفتگیهای ناشی از تنشهای برشی رینولدزی، آشفتگیهای ناشی از انتقال مومنتم در عرض و نیز جریانهای ثانویه، یک مدل تحلیلی شبهدوبعدی برای حل توزیع عرضی سرعت جریان و تنش برشی مرزی ارائه نمودند. با انتگرال گیری عرضی از توزیع سرعت بدست آمده، رابطه دبی – اشل رودخانه استخراج می گردد. مدل شیونو و نایت برای اولین بار نشان داد که از مدلهای آشفتگی می توان به طور موثری در مقاطع مرکب استفاده کرد گروی (1988) دانه ما

(2)

Lambert and Sellin 1996)

Wark et al. (1994) با صرفنظر کردن از اثر جریانهای ثانویه، مدلی شبهدوبعدی برای حل توزیع عرضی دبی جریان در مقاطع مرکب پیشنهاد نمودند. Lambert and جریان در مقاطع مرکب پیشنهاد نمودند. Bervine et al. (2000) و Sellin (1996) هم با اعمال فرضیاتی متفاوت، مدلهای شبهدوبعدی مختلفی را برای فرضیاتی متفاوت، مدلهای شبهدوبعدی مختلفی را برای حل توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در رودخانههای مستقیم و پیچانرود ارائه نمودند. (2016) انتقال و پخش، مدل Kordi et al. (2016) را اصلاح نمودند مدل (Kordi et al. 2015).

اگرچه مدلهای شبهدوبعدی فوق در حل توزیع عرضی سرعت جریان و تنش برشی دارای دقت مناسبی هستند اما در محاسبه توزیع عمقی متغیرهای هیدرولیکی، حل میدان جریان و نیز برآورد پارامترهای آشفتگی محدودیت دارند. به این منظور باید از روشهای دوبعدی و سهبعدی استفاده نمود.

در میانه دهه ۱۹۸۰ و با پیشرفت تجهیزات آزمایشگاهی، اندازه گیری های فراوانی از میدان سهبعدی سرعت جریان و پروفیل آشفتگی برای کانالهای مرکب مستطیلی و ذوزنقهای در مرکز تحقیقات علوم و مهندسی والینگفورد انگلستان صورت گرفت. در این زمان، استفاده از مدلهای آشفتگی دوبعدی ASM توسط (Keler and Rodi (1988) و مدلهای سهبعدی آشفتگی K-۶ توسط Krishnappan and (Lau (1982) توسعه يافت. اين مدلها جزئيات بيشتري از توزيع عرضي و عمقي سرعت، تنش برشي مرزي و جریانهای ثانویه در اختیار محققین قرار میدهند (Rodi) 1980, Launder and Spalding 1983, Krishnappan and Lau 1986, Keller and Rodi 1988, Thomas and .Williams 1995) مدلسازی سهبعدی جریان در مقاطع مرکب توسط محققین زیادی مورد توجه قرار گرفته است. بررسیها نشان مي دهد كه اغلب اين مطالعات به كمك مدلها و نرمافزارهای سهبعدی تجاری موجود انجام شده است. مطالعه (Thomas and Williams (1995) يكى از اولين

مطالعاتی است که به کمک کدنویسی و با استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ، میدان سرعت جریان در مقاطع مرکب شیهسازی شده است. Othman and Valentine (2006) با مدلسازی عددی

سهبعدی جریان در مقاطع مرکب، میدان سرعت و نیز

جریانهای ثانویه را به کمک مدل آشفتگی K-E غیرخطی و مدل تنشهای رینولدزی (RSM) شبیهسازی نمودند. نتایج شبیهسازی عددی بیانگر دقت مناسب هر دو مدل در تخمین میدان دوبعدی سرعت جریان و نیز شدت جريانهای ثانويه بود. (Fisher Antze et al. (2011) با استفاده از نرمافزار سهبعدی SSIIM و نیز مدل آشفتگی κ-ε، اثر پوشش گیاهی بر هیدرولیک جریان در دشتهای سیلابی را شبیهسازی نمودند. نتایج پروفیلهای عرضی و عمقی سرعتهای بدست آمده از این مطالعه در مقایسه با دادههای آزمایشگاهی سـه کانال مرکب مستقیم با شرایط متفاوت هنـدســي و تراكم پوشــش گيـاهي، نســبتـاً رضايت بخش بود. (2013) Conway et al. با استفاده از نرمافزار SSIIM هیدرولیک جریان در کلنالهای مرکب با بستر صلب و آبرفتی را مدلسازی نمودند. آنها از روش upwind مرتبه دوم (کوئیک) برای تجزیه ترمهای انتقال و نیز مدل آشفتگی K-E استاندارد استفاده کردند. این تحقیق نشان داد که نتایج روابط دبی-اشل و توزیع عرضی سرعت جریان بدست آمده از این نرمافزار دارای دقت مناسبی است. (Najafian et al. (2006) با استفاده از نرمافزار FLOW-3D هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب غیرمنشوری را مدلسازی نمودند. Jazizadeh and Zarrati (2008) با ارائه یک مدل عددی سے بعدی به محاسبه پروفیل سطح آب و نیز الگوی جریان در کانالهای مرکب پرداختند. مدل آنها تراز سطح آزاد آب را بدون حل هیچ معادله اضافهای محاسبه می کند. آنها برای واسنجی مدل خود از دادههای آزمایشگاهی Tominaga and Nezu (1991) و Ayyoubzadeh (1997) استفاده کردند. در این مدل، عمق آب به ۱۴ بخش تقسیم شده و در هر بخش، با انتگرال گیری از معادله مومنتم در ارتفاع مشخص آن بخش، مقادیر متوسط محاسبه می شوند. در هر بخش، معادلات پیوستگی و مومنتم مجزایی مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین تراز سطح آب به کمک معادله پیوستگی و الگوریتم تصحیح عمق محاسبه میشود. برای مدلسازی ساختار پیچیده و سهبعدی جریان از مدل دو معادلهای K-E استفاده شده است. مولفه سرعت در جهت عمق جریان از معادله پیوستگی محاسبه شده و این امر، معادله سهبعدی را به یک معادله دوبعدی تبدیل می کند. مقایسه نتایج مدل عددی با دادههای آزمایشگاهی نشان داد که میدان سرعت جریان و تنش برشی محاسباتی در

مناطقی که اثر جریانهای ثانویه قابل صرفنظر کردن است، انطباق بسیار خوبی با دادههای آزمایشگاهی دارد. در مرز تماس مقطع اصلی با دشت سیلابی به دلیل وجود جریانهای ثانویه بسیار قوی، نتایج مدل عددی دارای حداکثر خطایی معادل ۱۲/۵ درصد است. .Xiao et al (2018) با استفاده از مدل سازی سهبعدی، اثر شیب جداره بر الگوی جریان شامل توزیع سرعت در جهت جریان، توزیع تنش برشیی مرزی، جریانهای ثانویه، ساختار آشفتگی و نرخ دبی جریان در کانالهای مرکب تک سیلابدشتی را بررسی نمودند. آنها با استفاده از نرمافزار FLUENT، معادلات حاکم را حل نموده و به کمک روش مرتبه دوم کوئیک برای تجزیه ترمهای انتقال و نیز استفاده از یک شبکه ناهمگن شش وجهی با مجموع ۵۵۴۴۳ گره، جریان در این کانالها را شبیهسازی نمودند. نتایج آنها در مقایسه با دادههای آزمایشگاهی ( Tominaga and Nezu, 1991) دارای دقت مناسبی بوده است.

بر خلاف مقاطع مركب كلاسيك كه با تحقيقات فراوان محققين مختلف همراه بودهاند، تاكنون مقاطع مركب چندسیلابدشتی به صورت بسیار محدود مورد مطالعه قرار گرفتهاند. (Wang et al. (2014) با انجام مطالعهای آزمایشـگاهی، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب چندسیلابدشتی با پوشش گیاهی را بررسی نمودند. Chen et al. (2019) با استفاده از دادههای .wang et al (2014)، مدلی یکبعدی برای استخراج رابطه دبی-اشل مقاطع مرکب چندس\_پلابدش\_تی را توس\_عه دادند. Singh (2021) نیز میدان جریان و پارامترهای آشفتگی را در این مقاطع به صـورت آزمایشـگاهی بررسـی نمود. با توجه به محدود بودن مطالعات انجام شـده در مقاطع مركب چندسیلابدشتی، در تحقیق حاضر یک مدل ریاضی سهبعدی در محیط برنامه C بر اسهاس معادلات ناویر -استوکس و با فرض جریان یکنواخت و فشار هیدرودینامیک برای این مقاطع توسعه داده شده است. در مدل سهبعدی ارائه شده برای شبیهسازی جریان از روش عدی حجم محدود استفاده شده و برای حل روابط انتقال، روش Quick که نسبت به روشهای Quick low و ... دارای دقت بالاتری است بکار گرفته شده است. مدل ارائه شده توانایی شبیهسازی جریان در تمامی مقاطع مركب شامل مركب كلاسيك، مركب تكسيلابدشتى و چندسپلابدشتی را دارد. برای بررسی پارامترهای آشفتگی

از مدل آشفتگی RNG K-ε استفاده شده است که توانایی بالایی در شـــبیهســازی جریان در مقاطع غیر مدور دارد. اســتفاده از موارد فوق در مدل ســهبعدی پیشــنهادی این

تحقیق، توانایی و قابلیت شبیهسازی این مدل را به مراتب از مدلهای عددی ارائه شده تاکنون ارتقاء میدهد.

### ۳-مواد و روشها ۳-۱- معادلات جریان

با اعمال فرض جریان دائمی و یکنواخت، فشار هیدرودینامیک و تراکمناپذیر بودن سیال، معادلات اندازه حرکت ناویر-استوکس در سه جهت  $X \cdot Y \cdot Z$  به همراه رابطه پیوستگی به صورت زیر خواهند بود (Vreugdenhil) (1994):

<i>∂</i> ρu <i>∂</i> ρuu <i>∂</i> ρuv <i>∂</i> ρuw <i>∂</i> ρu'u'	
$\frac{\partial t}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial z} + \frac{\partial x}{\partial x}$	
$+\frac{\partial \rho u' v'}{\partial \rho u' w'} + \frac{\partial \rho u' w'}{\partial \rho u' w'} = -\frac{\partial \rho}{\partial \rho}$	(3)
$\partial y \partial z \partial x$	
$+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + s_{mx}$	
$\frac{\partial \rho v}{\partial \rho v u} + \frac{\partial \rho v v}{\partial \rho v v} + \frac{\partial \rho v w}{\partial \rho v u'} + \frac{\partial \rho v' u'}{\partial \rho v' u'}$	
$\frac{\partial t}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial z} + \frac{\partial x}{\partial x}$	
$+\frac{\partial \rho v' v'}{\partial \rho v' w'} + \frac{\partial \rho v' w'}{\partial \rho v' w'} = -\frac{\partial p}{\partial \rho}$	(4)
$\partial y \partial z \partial y$	
$+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + s_{\rm my}$	
<i>∂</i> ρw <i>∂</i> ρwu <i>∂</i> ρwv <i>∂</i> ρww <i>∂</i> ρw'u'	
$\frac{\partial t}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial z} + \frac{\partial x}{\partial x}$	
$+\frac{\partial \rho w' v'}{\partial \rho w' w'} + \frac{\partial \rho w' w'}{\partial \rho w' w'}\frac{\partial p}{\partial \rho}$	(5)
$\partial y = \partial z = \partial z$	(5)
$+ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial w} + \frac{\partial^2 w}{\partial w} + \frac{\partial^2 w}{\partial w}\right) + s$	
$^{+\mu}\left(\partial x^{2} + \partial y^{2} + \partial z^{2}\right) + s_{mz}$	
$\frac{\partial u}{\partial u} + \frac{\partial v}{\partial v} + \frac{\partial w}{\partial w} = 0$	76)
$\partial x + \partial y + \partial z = 0$	(0)

در روابط فوق u.v.w مولفههای سرعت جریان بهترتیب در سه جهت p ، x.y.z چگالی سیال، p فشار هیدرواستاتیک، u'.v'.w' مولفههای سرعت نوسانی بهترتیب در جهات  $S_{mx}.S_{my}.S_{mz}$  ، x.y.z ترمهای منبع بهترتیب در جهات x.y.z ، و  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال هستند.

Boussinesq (1877) تنشهای رینولدز را متناسب با نرخ تغییر شکلها، به صورت رابطه (۲) ارائه نمود:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) + \lambda \underbrace{\left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)}_{\text{div}(U)}$$
(7)

i بیانگر مولفه سرعت متوسط جریان در جهت i میباشد. مقادیر  $U_2$ ,  $U_2$ ,  $U_2$ , V,  $U_3$  میباشد. مقادیر  $U_2$ ,  $U_2$ ,  $U_2$ ,  $U_2$ , V, v و  $N_2$ ,  $X_1$  و  $V_2$ ,  $X_2$ ,  $X_1$  و  $X_2$ ,  $X_1$  و  $X_2$ ,  $X_3$  (Launder and Spalding, 1983) (Launder and Spalding, 1983) با بررسی رابطه بوسینسک و تناقض آن بهدلیل عدم برابری مجموع تنرسهای رینولدز نرمال با دو برابر انرژی جنبشی توربولانسی برای مایعات، رابطه (۸) را برای اصلاح این نقص ارائه کردند. در این تحقیق برای تبدیل تنشهای رینولدز به نرخ تغییر شکلهای ذره سیال از این رابطه استفاده شده است (Versteeg and Malalasekera 2007).

$$\tau_{ij} = -\rho u_i' u_j' = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \qquad (8)$$

که k آشفتگی جریان و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونیکر است که برای  $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$  و  $i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$  می باشد. با جاگذاری رابطه (۸) در روابط (۳) تا (۵) و با صرفنظر کردن از لزجتهای مولکولی خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{9}$$

$$-\frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + s_{mx}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial (v_t \frac{\partial v}{\partial y})} + \frac{\partial}{\partial (v_t \frac{\partial v}{\partial y})} + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\rho} \frac{\partial w}{\partial (v_t \frac{\partial w}{\partial x})} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial (v_t \frac{\partial w}{\partial x})} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) \tag{11}$$

$$-\frac{2}{3}\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial z} + \mathbf{s}_{mz}$$

 $g \cos \theta = g \cos \theta$  مولفههای شتاب ثقل بهترتیب در جهت  $g \cos \theta$  عمق (z) و جهت جریان (x) در کانالهای شیبدار می باشند که در ترم منبع گنجانده می شوند. در روابط فوق عبارت با فرم کلی  $div(\phi U)$  و  $div(v_t grad \phi)$  بهترتیب بیانگر جملات انتقال و پخش هستند که در آنها  $\phi$  یک خاصیت

div(vtgradw)

سیال مانند سرعتهای جریان در جهات مختلف مختصات و U بردار سرعت میباشند.

#### ۲-۳- معادلات آشفتگی

برای حل ساختار پیچیده و سهبعدی جریان، علاوه بر حل روابط تنشهای رینولدز و پیوستگی، به یک مدل آشفتگی برای تعیین مقادیر لزجتهای گردابی در نقاط مختلف جریان نیاز است. مدل آشفتگی دو معادلهای RNG K-E، نسبت به سه مدل آشفتگی دو معادلهای با تئوری مشابه Rodi and Spalding 1970, Ng and )  $\mathbf{k} - \mathbf{k} \mathbf{l}$  يعنى مدل Gibson and Spalding ) k - w ، مدل (Spalding 1983)، مدل (Launder and  $k - \varepsilon$  و مدل (1972, Spalding, 1983) Spalding, 1983) نتایج بهتری ارائه مینماید. مدل RNG K-ε توسط (1992) Yakhot et al. يشنهاد شد و اثر آشفتگیهای کوچک مقیاس را به صورت یک تابع تصادفی اجباری در معادلات ناویر استوکس نشان میدهد. این مدل مقیاسهای حرکتی کوچک را با وارد کردن اثر آنها در مقیاسهای حرکتی بزرگ و اصلاح لزجت از معادلات حاکم حذف می کند. در این تحقیق از این مدل آشفتگی دو معادلهای استفاده شده است. این دو معادله شامل ایجاد انرژی آشفتگی k و نرخ افت انرژی آشفتگی ٤ به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) تعریف می شوند:

 $\frac{\partial k}{\partial t} + \operatorname{div}(kU) = \operatorname{div}[\alpha_k(\nu + \upsilon_t)\operatorname{grad} k]$   $+ \tau_{ij}E_{ij} - \varepsilon$ (12)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \operatorname{div}(\varepsilon U) = \operatorname{div}[\alpha_{\varepsilon}(v + v_{t})\operatorname{grad}\varepsilon]$$
(13)  
+  $C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}E_{ij} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^{2}}{k}$ (13)  
>  $+ C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}E_{ij} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^{2}}{k}$ (13)  
>  $E_{ij}$ (13)  
>  $E_{i$ 

کنترل در هر یک از جهات به بررسی شار جریان ورودی و خروجی پرداخته میشود. فرم کلی معادلات ناویر -استوکس بعد از تبدیل انتگرال حجم به سطح به صورت رابطه (۱۷) می باشند:

$$\iiint_{\mathbf{CV}} \nabla \emptyset \, \mathbf{d} \forall = \iint \emptyset. \, \vec{\mathbf{n}}. \, \mathbf{ds}$$
(16)

$$\iiint_{cv} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{t}} \cdot \mathbf{d} \forall + \iiint_{cv} \mathbf{div}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{d} \forall = \\
\iiint_{cv} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{d} \forall \\
+ \iiint_{cv} \mathbf{div}(\mathbf{v}_{t} \cdot \mathbf{grad}(\mathbf{u})) \cdot \mathbf{d} \forall \\
- \iiint_{cv} \frac{2}{3} \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{d} \forall + \iiint_{cv} \mathbf{s}_{mx} \cdot \mathbf{d} \forall$$
(17)

لازم به ذکر است که در جملههای منبع و زمان تغییری ایجاد نخواهد شد. در شکل ۳ موقعیت قرار گیری پارامترهای جریان و آشفتگی روی شبکه جابه جا شده متعامد نشان داده است. در گسستهسازی جملات انتقال در معادلات ناویر-استوکس و آشفتگی، برای درنظرگرفتن بیشترین اثر بالادست، روش مرتبه دوم كوئيك بكارگرفته شده است. شکل ۴ به صورت شماتیک نحوه ارتباط گرهها در یک شبکه منظم و متعامد با روش کوئیک نشان داده شده است. در روش کوئیک از دو گره در بالادست صفحه کنترل برای وارد کردن اثر بالادست استفاده شده و با در نظر گرفتن گره پاییندست صفحه کنترل، اثر پخش را همواره وارد مینماید (Leonard 1979). در این روش مطابق شکل ۴ برای ۵ گره با مرکزیت گرهi - 2.i - 1.i.i + 1.i + 2حجم کنترل، خاصیت Ø با فرض جهت جریان از سمت چپ به راست روی صفحه کنترل راست به صورت فرم رابطه (۱۸) میباشد:

$$(\phi)_{i+\frac{1}{2}} = \frac{6}{8}(\phi_i) + \frac{3}{8}(\phi_{i+1}) - \frac{1}{8}(\phi_{i-1})$$
(18)

۴-۱- شرایط مرزی

برای مقادیر انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی آشفتگی در ورودی، باید توزیع K و 3 داده شود، (Nezu et al. 1993) با توجه به اینکه دسترسی به این توزیع در شرایط عملی دشوار است، میتوان مقدار آن را مطابق رابطه (۱۹) و با استفاده از شدت تلاطم ۲۰/۰۵  $T_i = 0$  و سرعت جریان ورودی کل المان سیال  $(i)_{ij}(e)$ ، به صورت مجموع نرخهای تغییر شکل المان ناشی از سرعتهای متوسط  $i_{ij}$  و سرعتهای نوسانی (i)'e) میباشد، به دلیل مقدار کم نرخ تغییر شکل نوسانی از سرعتهای نوسانی ij'e، میتوان از آن صرف نظر ناشی از سرعتهای نوسانی (i)'e'، میتوان از آن صرف نظر Versteeg and Malalasekera 2007). verstee and Malalasekera 2007). Versteeg and Malalasekera 2007). verstee and Malalasekera 2007).  $v_{ij}(t) = E_{ij} + e'_{ij}$ .  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$   $e_{ij}(t) = E_{ij} + e'_{ij}$ .  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$   $e_{ij}(t) = E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$  $v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ (15)

که در آن  $\mathcal{C}_{\mu}$  ضریب ثابت و بیبعد بوده و مقدار آن از جدول ۱ قابل تعیین است.

جدول ۱ ضرائب ثابت در روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۵) طبق پیشنهاد (۱۹۹2) . بیشنهاد (۱۹۹2) .

Table 1 Constant coefficients (12),(13) and (15)proposed by Yakhot et al. (1992)

<b>Constant Coefficient</b>	Value
$\sigma_k$	1.39
$\sigma_{\varepsilon}$	1.39
$C_{1\varepsilon}$	1.42
C 2e	1.68
β	0.012
$\eta_0$	4.38
C <sub>µ</sub>	0.0845

مدل RNG K-E توانایی شبیه سازی جریان های چرخشی و  $\mathcal{R}$  مدل RNG K-E توانایی شبیه مدل  $\mathcal{R} - \mathcal{E}$  استاندارد در شبیه سازی مجاری غیرمدور در محل گوشه ها و جریان های چرخشی را برطرف می نماید (Yakhot et al. 1992).

#### ۴-حل عددی معادلات حاکم

در حل عددی معادلات از روش حجم محدود و برای جلوگیری از ایجاد فشار نوسانی از شبکه ساختاری متعامد و جابهجا شده استفاده گردید (Patankar 1980). در روش حجم محدود با استفاده از قضیه دیورژانس که در رابطه (۱۶) نشان داده شده است، انتگرال روی حجم به انتگرال روی سطح تبدیل میشود و برای هر المان روی سطوح



Fig. 4 Schematic representation of the nodes used in the quick method (side view) (نمای جانبی) شکل ۴ نمایش موقعیت قرارگیری گردهای محاسباتی در روش کوئیک (نمای جانبی)

$$k = \frac{3}{2} \left( U_{ref} T_{i} \right)^{2} , \quad \varepsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{1}$$
(19)  
$$\frac{\partial k}{\partial \eta} = 0 , \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} = 0 , \quad \frac{\partial U_{i}}{\partial \eta} = 0$$
(20)  
$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 , \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0 , \quad W = 0$$
  
$$\frac{\partial U_{i}}{\partial n} = 0 : \quad i = 1, 2$$
(21)

که  $\eta$  راستای جهت جریان، n راستای عمود بر سطح جریان L مشخصه طول میباشد (l = 0.07 است که  $u_i$ معادل شعاع لوله میباشد). مولفههای سرعت جریان  $u_i$ عمود بر جداره و کف کانال برابر صفر هستند و در سطح Uref تعیین کرد. مقدار Uref با فرض ورود جریان به کانال بصورت مستقیم و بدون زاویه و بر اساس تخمین اولیهای مبتنی بر روش تجزیه قائم مقطع مرکب درنظر گرفته می-شود. مقدار بقیه نقاط شبکه در ابتدا صفر تعیین شده و با شروع محاسبات و بر اساس مقدار ورودی Iuref، مقادیر شروع محاسبات و بر اساس مقدار ورودی در خروجی بهتری برای آنها برآورد میشود. شرایط مرزی در خروجی بر اساس رابطه (۲۰) و در سطح جریان سیال بر اساس رابطه (۲۱) تعیین می گردند ( Suppoint): (2007)

جدار، مولفههای سرعت موازی با سطح جداره  $u_i$  دارای تغییرات صفر نسبت به جهت عمود بر جداره میباشند که شرط (۲۲) برای آنها برقرار است:  $\frac{\partial U_i}{\partial u_i} = 0$ 

 $\frac{1}{\partial x_i} = 0 \tag{22}$ 

که Xi جهت عمود بر دیوارهها و کف کانال میباشد.

۴-۲- واسنجی مدل

مدل های عددی نسبت به تغییرات هندسی، زبری بستر، اندازه مشها و… حساسیت متفاوتی دارند که بر نتایج مدل– سازی تاثیرگذار خواهد بود. در این مقاله مدل سهبعدی پس از انجام آزمون استقلال شبکه (تغییر ابعاد مشها) نسبت به تغییرات ضریب زبری بستر واسنجی شده است (شکل <sup>†</sup>). برای تعیین ارتفاع زبری موثر بستر و بر اساس شرایط زیرلایه لزج با بستر زبر و پیشنهاد (۲۳) استفاده شده است رابطه  $\frac{u}{u^*} = \frac{u}{u}$  به صورت رابطه (۲۳) استفاده شده است

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{30y}{k_s}\right)$$
(23)

که  $u^*$  سرعت برشی، k ثابت ون کارمن با مقدار ۷،۰/۴۱ موثر فاصله نزدیکترین شبکه تا جداره و  $k_s$  ارتفاع زبری موثر بستر میباشند. برای برقراری جریان در شرایط قانون دیواره، مقدار  $y^+ = \frac{u^* y}{v}$  باید شرط ۳۰۰۰  $y^+ < y^+ < v$ مقدار بوقرار شود. ارتباط  $k_s$  با ضریب زبری مانینگ بر اساس پیشنهاد (۱۹۳0) Limerinos مطابق با رابطه (۲۴) قابل بیان است:

$$k_{s} = \left(\frac{26}{MS}\right)^{6}$$
(24)

n که MS عدد مانینگ-استریکلر به صورت مقدار  $\frac{1}{n}$  و n ضریب زبری مانینگ است. در این تحقیق برای واسنجی ضریب زبری مانینگ در مدل ریاضی پیشنهادی (به کمک روابط (۲۳) و (۲۴))، به دادههای آزمایشگاهی نیاز است. بررسی مقالات موجود در زمینه مقاطع مرکب چندسیلابدشتی نشان داد که در این خصوص فقط دو Singh (2021) و Wang et al. (2014) و (2021) مطالعه آزمایشگاهی (2014) et al. (2014) بسیار محدوده موجود است. دادههای سیلابی این کانال، شبکهای از موانع

چوبی برای زبر کردن کف استفاده شده است. این موضوع مدلسازی الگوی سهبعدی جریان در دشتهای سیلابی را دشوار می کند. برای سادگی بیشتر، از دادههای آزمایشگاهی Singh (2021) که تعداد آنها نسبتاً کافی است استفاده شد. این آزمایشها در یک کانال با مقطع مرکب نامتقارن مستطیلی با یک مقطع اصلی به عرض ۰/۴۴۵ متر و دو دشت سیلابی به عرضهای ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در یک طرف مقطع اصلى انجام شده است (شكل۵). كف مقطع اصلى از شیشه بوده و برای زبر کردن کانال، بستر دشتهای سیلابی اول و دوم با یک لایه چمن مصنوعی با زبری یکنواخت پوشش داده شده است. طول این کانال ۲۰ متر، شیب طولی آن ۰/۰۰۳، و ارتفاع و عرض کل آن به ترتیب ۵۰/۰۰ و ۰/۷۴۵ متر مىباشند. عمق لبريز مقطع اصلى و نيز عمق لبريز دشت سیلابی اول معادل ۰/۰۴۲۵ متر درنظر گرفته شده-اند. دبی جریان این کانال نیز در محدوده ۶۰–۲۰ لیتر بر ثانیه بوده است. ). در آزمون استقلال شبکه، ابعاد بهینه شبکه محاسباتی در هر سه جهت طولی، عرضی و قائم به گونهای تعیین میشود که نتایج محاسباتی به ازاء ابعادی کوچکتر از آن، تغییر معنیداری نداشته باشد. برای انجام این آزمون، ابتدا از ابعاد یا سلولهای درشت استفاده می-شود. سپس به تدریج این ابعاد، کوچکتر شده و نتایج مدل-سازی در دو حالت مقایسه می گردد. اگر این نتایج در دو حالت درشت و ریز، اختلاف معنی داری با یکدیگر نداشته باشند، شبکه درشتتر به عنوان شبکه بهینه انتخاب می-شود. در غیراین صورت، باید ابعاد ریزتری نسبت به حالت شبکه دوم انتخاب شده و مراحل فوق تکرار می شود. نتایج این مراحل در شکل A-۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که دبی محاسبه شده به ازاء شبکه محاسباتی با ابعاد dz= ۰/۰۵ ،dx=۰/۲ و dz= ۰/۰۲ با دبی بدست آمده از شبکه ریزتر تفاوت معنی داری ندارد و شبکه ابعاد dy= /۰۵ ،dx=۰/۲ و dz= ۰/۰۲ به عنوان شبکه بهینه قابل انتخاب است. بر این اساس حداقل تعداد کل مشها حدود ۴۵۰۰ بدست آمد. با مشخص شدن ابعاد مش بهینه واسنجى مدل سهبعدي نسبت به ضريب زبري بستري انجام گرفت. مقطع اصلی این کانال از جنس شیشه بوده و ضریب زبری آن حدود ۰/۰۱ قابل قبول است. هر دو دشت سیلابی اول و دوم از چمن مصنوعی پوشش داده شده است، بنابراین ضريب زبرى آنها بايد واسنجى شود. به اين منظور، مدل ریاضی به ازاء یک عمق مشخص جریان و مقادیر متفاوت

ضریب زبری مانینگ دشتهای سیلابی اجرا شده و نتایج دبی کل کانال با دبی مشاهداتی مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل B-۶ نشان داده شده است. مشاهده میشود که به ازاء ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲، اختلاف دبیهای جریان محاسباتی و مشاهداتی حدود ۲/۱۲ درصد

میباشد که قابل قبول است. لازم به ذکر است کلیه بررسیهای صورت گرفته در آزمون استقلال مش و واسنجی مدل سهبعدی نسبت به ضریب زبری بستر به ازاء عمق نسبی ۲/۳ انجام گرفته است.



**Fig. 5** Pictorial representation of (A) longitudinal and (B) cross sectional views of the laboratory channel (Singh, 2021) Singh (2021) شکل ۵ نمایش پروفیل های طولی (A) و عرضی (B) کانال آزمایشگاهی





۵- تحلیل نتایج
۵-۱- توزیع سرعت طولی
توزیع دوبعدی سرعت طولی جریان در شکل ۷ نمایش داده
شده است. در این شکل نتایج آزمایشگاهی (٥-٤) و
محاسباتی (Δ-۲) در سه عمق نسبی جریان (۵-۱/۰) با
هم مقایسه شدهاند. تقریباً در تمامی شرایط و برای هر دو

حالت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی، مقادیر سرعت جریان در سیلابدشتهای اول و دوم به دلیل اثر متقابل جریان بین مقطع اصلی و سیلابدشت اول و نیز بین دو دشت سیلاب اول و دوم (ناشی از وجود پوشش گیاهی در کف)، کمتر بوده و حداکثر سرعت در میانه مقطع اصلی (متمایل به جداره سمت راست) و در فاصلهای دورتر از کف



Fig.7 Comparison of computed (A,B,C) and observed (a,b,c) streamwise isovels for relative depths of 0.1, 0.3 and 0.5 9 B ،A) مقایسه منحنیهای هم سرعت محاسباتی (B ،A و 9 C مایشگاهی (a, b, a) در عمقهای نسبی ۱/۰، ۲/۰ و ۰/۵

برای ارائه بهتری از میزان دقت و کارایی مدل ریاضی سهبعدی، در شکل ۸ و ۹ بهترتیب نتایج توزیع عرضی سرعت و منحنی دبی-اشل کانال برای عمقهای نسبی مختلف و در دو حالت محاسباتی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. در شکل ۸ موقعیت سیلابدشتهای اول و دوم و نیز عمق مقطع اصلی مشخص شده است. همانطور که مشاهده میشود، دقت نتایج مدل ریاضی در مقطع اصلی و سیلابدشتها (به ویژه سیلابدشت دوم) قابل قبول است، اما در محدوده مرز تماس مقطع اصلی با سیلابدشت اول خطای مدلسازی نسبتاً زیاد است. اگرچه این محدوده از جنبههای کانال و نزدیک به سطح آب رخ داده است. با افزایش عمق نسبی و افزایش عمق جریان روی سیلابدشتهای اول و دوم، اثر متقابل کاهش یافته و سرعت جریان افزایش یافته است که این موضوع برای عمقهای نسبی ۲/۳ و ۵/۰ کاملاً مشهود است. غیریکنواختی توزیع سرعت در مرزهای اتصال مقطع اصلی با سیلابدشت اول و نیز سیلابدشت اول با دوم به دلیل وجود جریانهای ثانویه و گردابی تشدید شده است. همچنین اثر متقابل جریان سریع و کند در این مرزها باعث ایجاد افت انرژی شده و سرعت طولی جریان با کاهش مواجه شده است. به طور کل مقایسه نتایج محاسباتی مدل سهبعدی با دادههای از نظر موقعیت و مقدار سرعتهای حداکثر و حداقل بیانگر دقت مناسب مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق است.



مختلف هیدرولیکی و افت انرژی دارای اهمیت است، اما سهم آن در دبی کل جریان تقریباً کم است. این موضوع در شکل ۸ قابل تایید است. مطابق این شکل، دبیهای کل جریان بدست آمده از مدل ریاضی در تمامی عمقهای نسبی انطباق خوبی با دادههای آزمایشگاهی دارند. میانگین قدرمطلق خطای مدل ریاضی در محاسبه دبی جریان حدود

۳/۹ درصد و حداکثر خطای آن حدود ۶/۲ درصد در عمق نسبی ۰/۱ بدست آمده است. معمولاً در عمقهای نسبی بسیار کوچک به دلیل شدت زیاد تبادل و انتقال مومنتوم بین مقطع اصلی و دشتهای سیلابی، دقت مدلهای محاسباتی کمتر است.



Fig. 8 Comparison of observed (a) and computed (b) lateral velocity distributions for relative depths of 0.1-0.5 (b) مشکل ∧ مقایسه نتایج توزیع عرضی سرعت در دو حالت آزمایشگاهی (a) و مدل سازی سهبعدی (b) برای عمقهای نسبی ۵/۱-۰/۱



Fig. 9 Comparition of the computed and observed stage-discharge curves for relative depths of 0.1-0.5 •/۱−۰/۵ شکل ۹ مقایسه منحنیهای دبی-اشل محاسباتی و آزمایشگاهی برای عمقهای نسبی

Journal of Hydraulics
??(?), ????
14

۵-۲- جریانهای ثانویه

به دلیل انتقال مومنتوم ناشی از اختلاف سرعتهای طولی در کانال اصلی و سیلابدشت اول و نیز بین سیلابدشتهای اول و دوم، در مرز تماس این مقاطع، جریانهای گردابی بوجود میآیند. این جریانها همچنین در گوشههای تند کانال و در نواحی نزدیک به سطح جریان آب مشاهده میشوند. در شکل ۱۰ الگوی جریانهای ثانویه در کانال مرکب چندسیلابدشتی (2021) Singh برای عمقهای نسبی ۰/۱، ۳/۰ و ۵/۰ و در دو حالت آزمایشگاهی (a-c) و محاسباتی با مدل ریاضی سهبعدی (d-f) نشان داده شده است. مشاهده میشود که سلولهای جریان ثانویه در سیلابدشتهای اول و دوم در مقایسه با مقطع اصلی بزر گتر

هستند. با افزایش عمق نسبی و کاهش گرادیان سرعتها، نرخ جریانهای ثانویه نیز کاهش مییابد. جریانهای گردابی در تمام عرض سیلابدشتها و به ویژه سیلابدشت دوم که دارای عرض بیشتری است قابل مشاهده میباشند. این موضوع احتمالاً ناشی از افزایش توان پخشیدگی و کاهش توان مومنتوم جریان طولی است. در این شکلها، توان مومنتوم جریان طولی است. در این شکلها، جریانهای ثانویه در سطح جریان، کف کانال و نیز در اختلاف در بزرگی مقدار آنها در مرز تماس کانال اصلی با سیلابدشت اول و نیز در مرز بین سیلابدشتهای اول و دوم تا نزدیک سطح آب بیانگر تاثیرپذیری وضعیت جریانهای گردابی از هندسه مقاطع مرکب چندسیلابدشتی است.



**Fig.10** Representation of experimental (a,b,c) and computional (d,e,f) secondary currents for relative depths of 0.1,0.3 and 0.5 (a, b, c) مریان های ثنویه در عمق های نسبی ۰/۱، ۳/۱۰ و ۵/۰ (a, b, c) مکل ۱۰ نمایش نتایج آزمایشگاهی (a, b, c) و نتایج مدل سهبعدی (b, c, f) جریان های ثنویه در عمق های نسبی ۱۰/۰، ۳/۰ و ۵/۰

#### ۶- نتیجهگیری

در این مقاله، یک مدل عددی سهبعدی برای تحلیل هیدرولیک مقاطع مرکب کلاسیک و چند سیلابدشتی پیشنهاد شند. دادههای آزمایشگاهی محدود و نیز شبیهسازیهای مدل سهبعدی نشان دادند که شدت آشفتگی و تبادل مومنتوم در مرز بین سیلابدشت اول و دوم کمتر از مرز بین کانال اصلی و سیلابدشت اول است که دلیل آن تفاوت زبریها و نیز گرادیان شــدیدتر سرعتهای جریان در مرز تماس کانال اصلی و سیلابدشت اول میباشد. اثر جریانهای ثانویه در مرز بین کانال اصلی و سیلابدشت اول با نزدیک شدن به سطح جریان کاهش مى يابد ولى اين جريان ها در مرز بين سيلابد شت اول و دوم تا تراز سطح آب به میزان قابل توجهی موثر هستند. این شرایط در کلیه عمقهای نسبی بررسی شده مشاهده می گردد و بیانگر اهمیت بیشتر اثر پخش جریان نسبت به انتقال در سیلابدشت دوم بخصوص در عمق نسبیهای کم مى باشد.

ارزیابی دقت مدل عددی پیشــنهادی نشــان داد که کارایی آن برای تخمین رابطه دبی-اشــل مقاطع مرکـب جندس\_يلابدش\_تي قابل قبول اس\_ت. مقاطع مركب چندسیلابدشتی دارای کاربرد ویژهای در مناطق شهری میباشـند. سـیلابدشـت اول این مقاطع با عرضـی کمتر و با هدف افزایش ظرفیت انتقال کانال یا آبراهه طراحی میشوند. سیلابدشت دوم نیز برای زیباسازی منظر شهری و افزایش تنوع زیستی به عنوان محیط تفریحی و گردشـگری مدنظر قرار دارد. این امر در زمان سـیلابهای شدید به عموم افراد نزدیک بستر رودخانه شرایط مناسب برای گریز از منطقه خطر را فراهم مینماید. با توجه به محدودیت دادههای آزمایشــگاهی در زمینه مقاطع مرکب چندسیلابدشتی به ویژه در حالتی که سیلابدشت دوم دارای یوشــش گیاهی و درختی باشـد، انجام مطالعات آزمایشــگاهی در این خصـوص توصـیه میشـود. به نظر ميرسد كه وجود درختان، ضمن ايجاد تنش برشي زياد در کف بستر سیلابدشت دوم، باعث استهلاک زیاد انرژی و کاهش قابل توجه در ظرفیت انتقال مقطع مرکب چند سیلابدشتی می گردد.

۷- فهرست علايم Р فشار (*kgm<sup>-1</sup>s<sup>-2</sup>*) g شتاب ثقل (ms<sup>-2</sup>) U.  $(ms^{-1})$  سرعت در جهت جریان 12 سرعت در جهت عرض (*ms-1*) w سرعت در جهت عمق (*ms*-1) u' سرعت نوسانی آشفتگی در جهت جریان(*ms*<sup>-1</sup>) v'سرعت نوسانی آشفتگی در جهت عرض (*ms*-1) w' سرعت نوسانی آشفتگی در جهت عمق (*ms*-1)  $\rho \overline{u'u'}$  $(Nm^{-2})$  تنش رینولدز نرمال در جهت جریان  $\rho \overline{v'v'}$ تنش رینولدز نرمال در جهت عرض (*Nm*-<sup>2</sup>)  $\rho \overline{w'w'}$ تنش رینولدز نرمال در جهت عمق (*Nm*-2)  $\rho \overline{u'v'}$ تنش رينولدز برشي (*Nm<sup>-2</sup>*)  $\rho \overline{u'w'}$ تنش رينولدز برشي (*Nm*<sup>-2</sup>)  $\rho \overline{v'w'}$ تنش رينولدز برشي (Nm<sup>-2</sup>) K انرژی جنبشی آشفتگی (m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)  $T_i$ شدت آشفتگی l طول مشخصه L معادل شعاع لوله S شيب بستر كانال  $E_{ii}$ نرخ تغيير شكلها علايم يونانى: لزجت دینامیکی (*kgm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>*) μ γ وزن مخصوص (*Nm*-<sup>3</sup>) تنش ويسكوزيته (Nm<sup>-2</sup>)  $\tau_{ij}$  $\delta_{ii}$ دلتای کرونیکر Re عدد رينولدز  $v_t$ لزجت گردابهای (m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) ε نرخ تلفات انرژی جنبشی (m<sup>2</sup>s<sup>-3</sup>)  $C_{\mu}$ ضریب لزجت گردابهای  $C_{1\varepsilon}$ ضریب ثابت نرخ تلفات انرژی جنبشی  $C_{2\varepsilon}$ ضريب ثابت نرخ تلفات انرژی جنبشی λ ضریب لزجت گردابهای  $\sigma_{\varepsilon}$ ضريب يخش نرخ تلفات انرژى آشفتكى

transfer for practical flow computation in compound channels. Journal of hydraulic engineering, 125(7), 696-706.

Chen, G., Zhao, S., Huai, W., and Gu, S. (2019). General model for stage–discharge prediction in multi-stage compound channels. Journal of Hydraulic Research, 57(4), 517-533.

Conway, P., O'Sullivan, J. J., and Lambert, M. F. (2013). Stage-discharge prediction in straight compound channels using 3D numerical models. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,

Fischer-Antze, T., Stoesser, T., Bates, P., and Olsen, N. (2001). 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. Journal of Hydraulic Research, 39(3), 303-310.

Gibson, M., and Spalding, D. (1972). Two-equation model of turbulence applied to prediction of heat and mass-transfer in wall boundary layer. Mechanical Engineering, NewYork. Boundry-Layers. Mechanical Engineering,

Jazizadeh, F., and Zarrati, A. (2008). Development of a three-dimensional numerical model to solve shallow-water equations in compound channels. Canadian Journal of Civil Engineering, 35(9), 963-974.

Keller, R., and Rodi, W. (1988). Prediction of flow characteristics in main channel/flood plain flows. Journal of Hydraulic Research, 26(4), 425-441.

Kordi, H., Amini, R., Zahiri, A., and Kordi, E. (2015). Improved Shiono and Knight method for overflow modeling. Journal of Hydrologic Engineering, 20(12), 04015041.

Krishnappan, B. G., and Lau, Y. L. (1986). Turbulence modeling of flood plain flows. Journal of hydraulic engineering, 112(4), 251-266.

Lambert, M., and Sellin, R. (1996). Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. Journal of Hydraulic Research, 34(3), 381-394.

Launder, B. E., and Spalding, D. B. (1972). Lectures in mathematical models of turbulence.

Launder, B. E., and Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion (pp. 96-116). Elsevier.

Leonard, B. P. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Computer methods in applied mechanics and engineering, 19(1), 59-98.

Limerinos, J. T. (1970). Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels (Vol. 1898). US Government



۸ – تشکر و قدردانی

با سپاس و قدردانی از دکتر آزاده جعفری استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه تهران برای تلاش قابل تقدیر ایشان در جهت گسترش عدالت آموزشی که از برخی آموزشهای ایشان در مراحل اولیه این تحقیق استفاده شده است.

#### ۹- منابع

Ackers, P. (1991). Hydraulic design of straight compound channels. Volume 1-summary and design method, Volume 2-appendices.

Ackers, P. (1993). Flow formulae for straight twostage channels. Journal of Hydraulic Research, 31(4), 509-531.

Al-Khatib, I. A., Abaza, K. A., and Fkhidah, I. A. (2014). Prediction of zonal and total discharges in smooth straight prismatic compound channels using regression modeling. Flow Measurement and Instrumentation, 38, 40-48.

Azamathulla, H. M., and Zahiri, A. (2012). Flow discharge prediction in compound channels using linear genetic programming. Journal of hydrology, 454, 203-207.

Bousmar, D., and Zech, Y. (1999). Momentum

Shiono, K., and Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. Journal of fluid mechanics, 222, 617-646.

Singh, P. K. (2021). Experimental study on the flow structure of asymmetric compound channels. PhD Thesis, School of Civil Engineering, University of Liverpool, China, 311P.

Spalding, D. (1983). Heat transfer from turbulent separated flows. In Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion (pp. 9-21). Elsevier.

Thomas, T., and Williams, J. (1995). Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel. Journal of Hydraulic Research, 33(1), 27-41.

Tominaga, A., and Nezu, I. (1991). Turbulent structure in compound open-channel flows. Journal of hydraulic engineering, 117(1), 21-41.

Unal, B., Mamak, M., Seckin, G., and Cobaner, M. (2010). Comparison of an ANN approach with 1-D and 2-D methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. Advances in engineering software, 41(2), 120-129.

Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson education., England, 503P.

Vreugdenhil, C. B. (1994). Numerical methods for shallow-water flow (Vol. 13). Springer Science and Business Media,

Wang, W., Huai, W.-x., and Gao, M. (2014). Numerical investigation of flow through vegetated multi-stage compound channel. Journal of Hydrodynamics, 26(3), 467-473.

Wark, J., James, C., and Ackers, P. (1994). Design of straight and meandering compound channels. RandD Report, 13.

Yakhot, V., and Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. Journal of Scientific Computing, 1(1), 3-51. https://doi.org/10.1007/BF01061452

Zahiri, A., and Azamathulla, H. M. (2014). Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. Neural Computing and Applications, 24(2), 413-420.



Printing Office Washington, DC.

Najafyan, S., Yonesi, H., Parsai, A., and Torabi-Poude, H. (2016). Physical and Numerical Modeling of Flow in Heterogeneous Roughness Non-Prismatic Compound Open Channel. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 17(66), 87-104.

Najafzadeh, M., and Zahiri, A. (2015). Neuro-fuzzy GMDH-based evolutionary algorithms to predict flow discharge in straight compound channels. Journal of Hydrologic Engineering, 20(12), 04015035.

Nezu, I., Tominaga, A., and Nakagawa, H. (1993). Field measurements of secondary currents in straight rivers. Journal of hydraulic engineering, 119(5), 598-614.

Ng, K. a., and Spalding, D. B. (1983). Turbulence model for boundary layers near walls. In Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion (pp. 74-84). Elsevier.

Othman, F., and Valentine, E. M. (2006). Numerical modelling of the velocity distribution in a compound channel. J. Hydrol. Hydromech, 54(3), 269-279.

Parsaei, A., and Haghiabi, A. H. (2015). Hydraulic analysis of compound open channel. Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 2(1), 137-142.

Parsaie, A., and Haghiabi, A. H. (2017). Improving modelling of discharge coefficient of triangular labyrinth lateral weirs using SVM, GMDH and MARS techniques. Irrigation and drainage, 66(4), 636-654.

Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publ. Corp., New York, 58, 288.

Rodi, W. (1980). Turbulence models and their application in hydraulics-A state-of-the-art. IAHR Publication, DELFT, The Netherlands.

Rodi, W., and Spalding, D. B. (1970). A twoparameter model of turbulence, and its application to free jets. Wärme-und Stoffübertragung, 3(2), 85-95.

Sahu, M., Khatua, K., and Mahapatra, S. (2011). A neural network approach for prediction of discharge in straight compound open channel flow. Flow Measurement and Instrumentation, 22(5), 438-446.

Sellin, R. H. J. (1964). A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. La Houille Blanche(7), 793-802.

Shiono, K., and Knight, D. (1988). Two-dimensional analytical solution for a compound channel. Proceedings of 3rd international symposium on refined flow modelling and turbulence measurements,