



## Study of flow hydraulic in the middle embayment using a numerical model

FATEMEH ZAHRA ASADI<sup>1</sup>, MEHDY MEFTAH HALAGHI<sup>✉2</sup>, AMIR AHMAD DEHGHANI<sup>3</sup>, ESMAEIL KORDI<sup>4</sup>

1. Water Science Engineering Department. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan, Iran, fzasadi.2018@yahoo.com

2. Corresponding Author, Water Science Engineering Department. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan, Iran, meftahhalaghi@gmail.com

3. Water Science Engineering Department. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan, Iran, amirahmad.dehghani@gmail.com

4. Department of Civil Engineering. Mirdamad Institute of Higher Education. Gorgan, Iran, esmaeilkordi@gmail.com

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Feb. 14, 2022

**Received:** Apr. 27, 2022

**Accepted:** May. 14, 2022

**Published online:** June. 22, 2022

**Keywords:**

Middle embayment,  
Flow structures,  
Models of turbulence,  
Flow3D model.

The area of an embayment and its characteristics, which are located along a river, are the most important factor for the maintenance of different species of Flora and fauna. To study the hydraulic characteristics of the flow in the embayment, a three-dimensional simulation model is needed to detect the exact location of the size and shape of the vortices. In this study, the data obtained from experiments, performed at Shahroud University of Technology, have been used (2019 - 2020). Measurements were performed on a continuous and homogeneous cavity flow with free surface in a square embayment with dimensions of 0.3 \* 0.3 cm in 4 discharges (0.017, 0.024, 0.028, 0.033 / 0 cubic meters per second). Gyre formation observed in the embayment. In order to identify and analyze the flow pattern, numerical modeling was performed using physical model data and Flow3D numerical model. The RNG turbulence model, which was more consistent with the actual data, was selected and used by calibration. The flow pattern in the bay area showed that the created rotational cycle is a circular gyre. The speed at the entrance to the square embayment has a downward trend to half, and after reaching the zero point in the middle of the embayment, it finds an upward trend again. The longitudinal velocity, which is greater than the transverse and deep velocities, is also symmetrical in the embayment. Also, the transverse velocity has a negative direction in the first half of the embayment and a positive direction in the last half, which indicates the counter-clockwise movement of the gyre.

Cite this article: Asadi, F. Z., Meftah Halaghi, M., Dehghani, A. A., & Kordi, E. (2022). Study of flow hydraulic in the middle embayment using a numerical model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 849-870.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339124.669209>



## مطالعه هیدرولیک جریان در خلیج میانی با استفاده از مدل عددی

فاطمه زهرا اسدی<sup>۱</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۲</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۳</sup>، اسماعیل کردی<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، Fzasadi.2018@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، meftahhalaghi@gmail.com

۳. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، amirahmad.dehghani@gmail.com

۴. گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی میرداماد، گرگان، گرگان، ایران، esmaeilkordi@gmail.com

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۴/۱

## واژه‌های کلیدی:

خلیج میانی،

ساختارهای جریان،

مدل‌های آشفتگی،

مدل Flow3D

سطح یک خلیج و مشخصه‌های آن که در مسیر یک رودخانه قرار دارد مهمترین عامل برای نگهداری گونه‌های مختلف زندگی گیاهی و جانوری به شمار می‌آید. برای بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در خلیج، نیاز به یک شبیه‌سازی سه‌بعدی است که بتواند آن را به خوبی مدلسازی نموده و محل دقیق اندازه و شکل گردابه‌ها را تشخیص دهد. در این پژوهش داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه صنعتی شاهرود مورد استفاده قرار گرفته است (سال‌های ۹۸ و ۹۹). اندازه‌گیری‌ها بر روی یک جریان حفره‌ای دایمی و همگن با سطح آزاد در یک خلیج مربعی شکل با ابعاد  $0.3 \times 0.3$  متر، در ۴ دبی ( $0.17$ ،  $0.24$ ،  $0.28$ ،  $0.33$  مترمکعب بر ثانیه) انجام گرفت. نتایج مشاهداتی وجود یک سیکل گردشی بزرگ مقیاس در محدوده داخلی خلیج را تایید نمود. به منظور شناخت و تحلیل الگوی جریان، با استفاده از داده‌های مدل فیزیکی، شبیه‌سازی هیدرولیکی به کمک مدل عددی Flow3D انجام شد. با انجام کالیبراسیون، مدل آشفتگی RNG که بیشترین تطابق را با داده‌های واقعی داشته، انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. الگوی جریان در محدوده خلیج نشان داد سیکل چرخشی ایجاد شده بصورت یک حلقه دایره‌ای می‌باشد. سرعت در ورود به خلیج تا نیمه دارای روند نزولی بوده پس از رسیدن به نقطه صفر در میانه خلیج مجدداً روند صعودی می‌یابد. سرعت طولی که مقدار بیشتری از سرعت‌های عرضی و عمقی دارد نیز در محدوده خلیج دارای تقارن می‌باشد. سرعت عرضی در محدوده خلیج بیشتر از کانال اصلی بوده و در میانه خلیج، مقدار آن به بیشینه خود می‌رسد. همچنین سرعت عرضی در نیمه ابتدایی خلیج جهت منفی و در نیمه انتهایی جهت مثبت دارد که نشان دهنده حرکت پادساعتگرد حلقه گردش می‌باشد.

استناد: اسدی، فاطمه زهرا؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ دهقانی، امیراحمد؛ و کردی، اسماعیل (۱۴۰۱). مطالعه هیدرولیک جریان در خلیج میانی با استفاده از مدل عددی. مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۴)، ۸۴۹-۸۷۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339124.669209>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

مطالعات جریان آب در رودخانه‌ها و مناطق ساحلی از چند دهه قبل به طور تجربی در آزمایشگاه‌ها یا بصورت صحرایی و همچنین به صورت عددی از طریق مدل‌های ریاضی انجام شده است. تحقیقات تجربی زیادی وجود دارد که بر ویژگی‌های جریان آشفتنه متمرکز شده‌اند (Prinos *et al.* 2003; Javrela 2005; Bigillon *et al.* 2006; Keramaris and Prinos 2009).

جریان آشفتنه در محل تلاقی رودخانه‌ها، فصل مشترک جریان در میدان آبشکن، جریان در ورودی بندرگاه یا حفره جانبی، جریان در فصل مشترک سیلابدشت و مجرای اصلی مقاطع مرکب و همچنین جریان در حضور پوشش گیاهی همگی مثال‌هایی از جریان‌های کم‌عمق هستند. خلیج‌های<sup>۱</sup> میانی یا حفره‌های جانبی<sup>۲</sup> بعنوان یکی از عوارض طبیعی یا مصنوعی ایجاد شده، که معمولاً دارای شرایط جریان کم‌عمق<sup>۳</sup> می‌باشند، به نوبه خود بر شرایط هیدرولیکی جریان اثر می‌گذارند. این عوارض با ایجاد ساختارهای ثانویه و لایه‌های برشی، فرآیندهای مهم هیدرودینامیکی که در اغلب مسائل مهندسی هیدرولیک نقش مهمی در شکل‌گیری رفتار عمومی جریان دارند را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهند.

جریان‌های حفره‌ای به دلیل کاربردهای مهندسی متنوعشان از جمله توزیع آلودگی، مبادلات انرژی جریان و انتقال رسوب برای محققان و مهندسان همواره جالب بوده‌اند (Chang *et al.* 2007, Agarwal 2017; Lai *et al.* 2010). مطالعات در مورد ویژگی‌های جریان در یک حفره باز در چند دهه گذشته، نشان می‌دهد ویژگی‌های جریان در حفره نه تنها مربوط به شرایط جریان مانند تراکم جریان، ویسکوزیته، سرعت جریان آزاد، عمق جریان، ضخامت لایه مرزی و سطح آشفتگی (Immer *et al.* 2016; Rowley and Williams 2006)، بلکه به شکل حفره نیز وابسته است (Ozalp *et al.* 2010; Zhang and Hubert 2016).

ساخت ساختار جریان در خلیج‌های میانی<sup>۴</sup> رودخانه‌ها برای اندازه‌گیری انتقال جرم (مواد مغذی، رسوب یا آلودگی) بین جریان اصلی و میدان‌های غالب در حفره خلیج بسیار مهم است. مشاهدات آزمایشگاهی Faccenda در سال ۲۰۰۲، بر روی رفتار جریان در یک خلیج مربعی نشان داد انتقال ممتد سبب بوجود آمدن یک گردش آب درون خلیج می‌شود. این حلقه گردش به همراه یک لایه اختلاط و یک ناحیه هسته یا ناحیه سکون بوده است.

مطالعاتی بر روی لایه اختلاط و گردش افقی در ناحیه خلیج مستطیلی با هدف اندازه‌گیری آشفتگی‌ها و تنش رینولدز در محل حفره، مکانیسم تولید گردش افقی در حفره و همچنین تأثیر انرژی کانال اصلی در تشکیل چرخش توسط Sanjou و Nezu (2017) انجام گرفت. ایشان در مطالعات خود، اندازه‌گیری PIV را در فلوام آزمایشگاهی به طول ۹ متر و عرض ۱/۵ متر برای حفره‌های ایجاد شده با نسبت‌های مختلف انجام دادند و توزیع افقی متوسط بردارهای سرعت و تنش را اندازه‌گیری نمودند. توزیع افقی بردارهای سرعت در مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که نسبت ابعاد حفره به طور چشمگیری بر تشکیل گردش تأثیر می‌گذارد. در نسبت  $Lw / Bw = 1$  تنها یک سیکل گردش وجود دارد در حالیکه برای نسبت‌های بالاتر دو سیکل گردش وجود دارد. لایه اختلاط برای همه موارد به سمت پایین دست توسعه یافته ولی کمترین مقدار پیک آن برای نسبت یک می‌باشد. یک تحلیل تجربی از توربولانس در یک حفره مستطیلی با نسبت‌های نسبتاً بزرگ با استفاده از تکنیک PIV توسط Guan *et al.* (2018) شده است. سرعت متوسط اندازه‌گیری شده با زمان و توزیع تنش برشی رینولدز در داخل حفره نشان داد که الگوی جریان و ساختارهای آشفتگی به شدت تحت تأثیر نسبت ابعاد حفره قرار می‌گیرند.

در سال ۲۰۲۱، Navas-Montilla *et al.* از مطالعه تجربی و عددی جریان کم‌عمق در یک خلیج میانی بهره جستند. آزمایش‌ها در حفره جانبی مربعی شکل به ابعاد ۲۴ در ۲۴ سانتی‌متر در یک کانال به عرض ۲۴ سانتی‌متر، در چهار دبی انجام گرفت. برای هر آزمایش، میدان سرعت دوبعدی در ناحیه خلیج در اعماق مختلف با تکنیک PIV اندازه‌گیری شد. سپس برنامه عددی توسط کد نویسی در محیط C++ و نمایش سه‌بعدی نتایج در محیط متلب انجام گرفت. مدل عددی تهیه شده محل مرکز گردابه اصلی را به خوبی پیش‌بینی نمود ولیکن بزرگی سرعت در نزدیکی دیواره‌های خلیج بیش از حد تخمین زده شد.

بررسی‌ها حاکی از آن است که یافته‌ها و مشاهدات و داده‌های اندازه‌گیری شده بر فرآیندهای غالب هیدرودینامیکی و اکوسیستمی بر خلیج‌ها کم و بیش محدود می‌باشند لذا هنوز هم ادراک محققین از جزییات این فرآیندها و اثر متقابل آن‌ها کاملاً شکل نگرفته است. همچنین در مورد مدلسازی دو بعدی و سه بعدی جریان در خلیج‌های میانی اطلاعات کمی موجود است. بنابراین این تحقیق تلاش دارد تا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی هیدرولیکی خلیج میانی را با استفاده از مدل عددی Flow3D، انجام داده و در نهایت به تعیین الگوی جریان و بررسی برخی پارامترهای هیدرولیکی خواهد پرداخت.

## مواد و روش‌ها

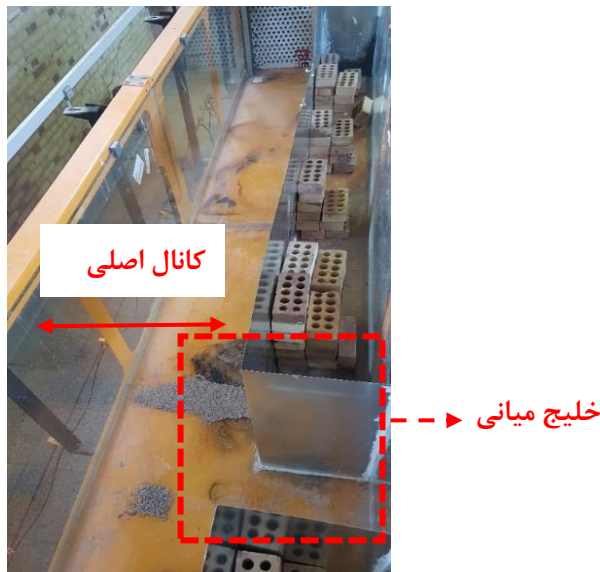
### مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در کانال آزمایشگاهی گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی شاهرود در سال‌های ۹۸ و ۹۹ انجام گرفت. کانال مورد

1 Embayment  
2 Side-cavities  
3 Shallow Flow  
4 Middle Embayment

استفاده یک کانال شیب‌پذیر به طول ۱۲ متر، عرض و عمق ۸۰ سانتی‌متر با دیواره‌هایی از جنس شیشه بوده است. به منظور آرام کردن جریان در ورودی، دو صفحه مشبک فلزی به فاصله ۲۰ سانتی‌متری از هم قرار داده شده است. مکانیزم جریان چرخشی بوده بطوری که جریان آب در حین خروج از کانال وارد مخزن شده و توسط پمپ مجدداً به ابتدای کانال پمپاژ می‌شود. کنترل دبی ورودی با تنظیم دور موتور پمپ به کمک یک دستگاه اینورتر هیوندای مدل N700E انجام گرفت.

خلیج میانی به ابعاد  $0/3 \times 0/3$  متر در ساحل چپ کانال و با استفاده از برش و شکل دادن قطعات ورق گالوانیزه ساخته و آببندی مدل توسط چسب آکواریوم انجام گرفت. باتوجه به ابعاد کانال اولیه (۸۰ سانتی‌متر)، عرض کانال اصلی در مجاورت خلیج میانی ۵۰ سانتی‌متر خواهد بود. محل خلیج با فاصله کافی از ورودی و خروجی کانال اصلی در نظر گرفته شد به‌طوری‌که جریان ورودی مخزن از بالادست و همچنین خروجی در پایین‌دست تأثیری در محدوده حجم کنترل خلیج نداشته باشند (شکل ۱).



شکل ۱. آماده‌سازی و ساخت خلیج میانی

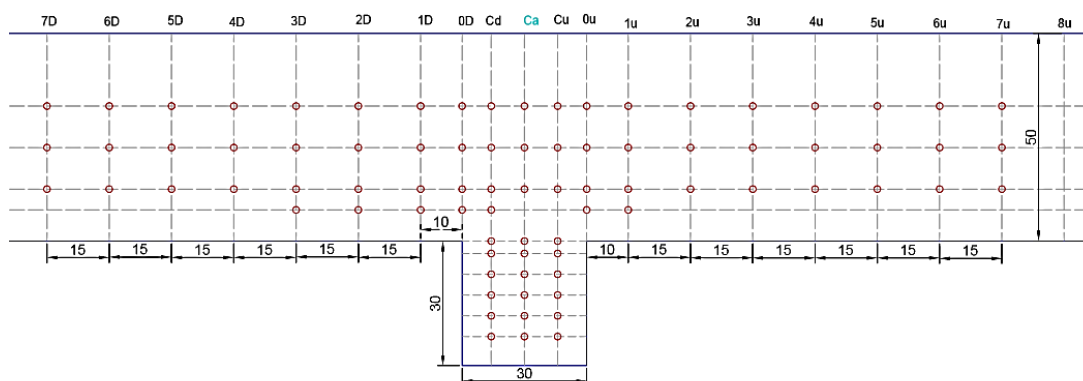
برای اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت و تعیین الگوی جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی Vectrino و یک کالسکه متحرک با قابلیت حرکت در طول و عرض کانال، استفاده گردید (شکل ۲). اندازه‌گیری‌های سرعت با فرکانس ۲۵ هرتز در مدت زمان ۲ دقیقه و در تراز  $0/6$  عمق جریان انجام شد، لذا در هر جهت ۳۰۰۰ داده سرعت خروجی دستگاه Vectrino بوده که این داده‌ها با استفاده از الگوریتم (Whal (2000,2003) و با فرض همبستگی<sup>۱</sup> بزرگتر از ۷۰، نسبت سیگنال به نویز<sup>۲</sup> SNR بزرگتر از ۱۵ و در نظر گرفتن معیار (Nikora&Goring (2002) در نرم‌افزار WinADV فیلتر شده و مورد استفاده قرار گرفتند. اندازه‌گیری سرعت در شبکه تعریف شده مطابق شکل ۳ در محدوده خلیج میانی و کانال اصلی انجام گرفت.



شکل ۲. سرعت‌سنج سه بعدی به همراه کالسکه قابل حرکت بر روی کانال

1 Correlation

2 Signal Noise Ratio



شکل ۳. شبکه اندازه‌گیری سرعت در خلیج میانی و کانال اصلی

آزمایش‌ها در دو سری (الف) عمق ثابت و دبی متغیر، (ب) عمق و دبی متغیر و با رژیم زیربحرانی آشفته مطابق با جدول ۱ انجام گرفت. در سری (الف) عمق جریان توسط دریچه کشویی انتهایی کانال ثابت نگه داشته شده و برداشت عمق و سرعت جریان در دبی‌های مختلف انجام گرفت. در آزمایش‌های سری (ب) با قراردادن یک سرریز لبه‌تیز در انتهای کانال اجازه تغییر عمق با تغییر دبی ورودی به جریان داده شد. بنابراین در آزمایش‌های سری (ب) با افزایش دبی شاهد افزایش عمق جریان در کانال اصلی بوده‌ایم.

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی در کانال اصلی آزمایش‌های انجام شده

سری آزمایش	دبی ورودی (مترمکعب بر ثانیه)	عرض کانال اصلی (متر)	عمق جریان در بالادست (متر)	متوسط سرعت کانال اصلی (متر بر ثانیه)	عدد رینولدز Re	عدد فرود Fr
الف	۰/۰۱۷	۰/۵	۰/۱۴۵	۰/۲۳۴	۲۱۵۱۹	۰/۱۹۷
	۰/۰۲۴	۰/۵	۰/۱۴۵	۰/۳۳۱	۳۰۳۸۰	۰/۲۷۸
	۰/۰۲۸	۰/۵	۰/۱۴۵	۰/۳۸۶	۳۵۴۴۳	۰/۳۲۴
	۰/۰۳۳	۰/۵	۰/۱۴۵	۰/۴۵۵	۴۱۷۷۲	۰/۳۸۲
ب	۰/۰۱۷	۰/۵	۰/۱۱	۰/۳۰۹	۲۳۶۱۱	۰/۲۹۸
	۰/۰۲۴	۰/۵	۰/۱۲	۰/۴۰۰	۳۲۴۳۲	۰/۳۶۹
	۰/۰۲۸	۰/۵	۰/۱۳	۰/۴۳۱	۳۶۸۴۲	۰/۳۸۱
	۰/۰۳۳	۰/۵	۰/۱۴	۰/۴۷۱	۴۲۳۰۸	۰/۴۰۲

### مدل عددی و معادلات حاکم بر جریان

دینامیک سیالات محاسباتی یا همان Computational Fluid Dynamics که به اختصار CFD نامیده می‌شود، یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است. CFD جایگاه ویژه‌ای بین روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی برای حل مسائل سیالات، انتقال حرارت و انتقال مواد به کمک سیال دارد (Cea et al., 2007; Barton et al., 2009; Chorda et al., 2010).

نرم‌افزار Flow3D یک مدل مناسب با کاربرد وسیع برای تحلیل مسائل پیچیده سیالات از جمله جریان‌های سه‌بعدی که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند، می‌باشد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود. از نظر استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده، نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌گیرد. معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت است. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان بدست می‌آید. بصورت کلی این معادله به شکل رابطه ۱ نوشته می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \varepsilon \frac{\rho u A_x}{x} = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن VF نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و ρ دانسیته سیال است. پارامترهای (u,v,w) نیز مولفه‌های سرعت

به ترتیب در جهت‌های  $(x,y,z)$  هستند.  $Ax$  نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت  $x$ ،  $Ay$  به طور مشابه نسبت سطوح جریان در جهات  $Az$  و جهت  $y$  و  $z$  هستند.  $R$  و  $\varepsilon$  نیز مشخصه‌های مربوط به نوع سیستم مختصات بوده و در مختصات کارتزین  $R=1$  و  $\varepsilon=0$  می‌باشند (Flow-3D User's Manual, 2011).

### مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار FLOW3D

شبیه‌سازی آشفتگی در نرم‌افزار با استفاده از یکی از پنج مدل: طول اختلاط پراتنل، یک معادله‌ای جنبشی آشفتگی، مدل دوبعدی  $k-\varepsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) انجام می‌شود. در ادامه شرح مختصری از مدل‌های آشفتگی مورد استفاده ارائه می‌گردد. مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$ : مقیاس طول در این مدل‌ها، برخلاف مدل‌های یک معادله‌ای، بدون تکیه بر روابط تجربی برآورد می‌شود. در این مدل‌ها، از کمیت آشفتگی که از حل معادلات دیفرانسیلی استخراج می‌گردد برای تخمین مقیاس طول و مقیاس سرعت استفاده می‌شود. این مدل توسط دو پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و اتلاف انرژی ( $\varepsilon$ ) وصف می‌شود. معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی  $\varepsilon_T$ ، عبارت است از:

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS \cdot G_T) + Diff_{\varepsilon} - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (۲)$$

در این رابطه  $CDIS1, CDIS2, CDIS3$  پارامترهای بی بعدی هستند که مقدارشان توسط کاربر اختصاص داده می‌شود و برای مدل دارای مقادیر پیش فرض  $۱/۴۴, ۱/۹۲, ۰/۲$  هستند.

مدل RNG: مدل RNG از روابطی همانند روابط موجود در مدل  $k-\varepsilon$  استفاده می‌کند با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل  $k-\varepsilon$ ، که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG بصورت صریح محاسبه می‌شوند. در عمل مدل RNG به تولید نتایج دقیق در جریان‌های با شدت آشفتگی کم و جریان‌های با نواحی برشی قوی شهرت دارد. همچنین مقادیر ضرایب  $CDIS1, CDIS3$  برابر  $۱/۴۲$  و  $۰/۰۸۵$  است. ضریب  $CDIS2$  با استفاده از دو عبارت انرژی آشفتگی  $k_T$  و تولید آشفتگی  $p_T$  محاسبه می‌شود.

مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ: در این مدل ایده اساسی که این است تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی می‌باشند، بطور مستقیم محاسبه گردند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شوند. این مدل اطلاعات بیشتری نسبت به روش RNG تولید می‌نماید.

### شبکه‌بندی و شرایط مرزی میدان محاسباتی

برای انجام شبیه‌سازی ابتدا مدل سه بعدی از بستر آزمایشگاهی در نرم افزار ساخته شد. سپس کلیات مسئله از جمله انتخاب حالت سیال تراکم پذیر، تعیین سیستم واحد، تعیین تعداد هسته‌های پردازشی مورد استفاده در فرآیند اجرا و ... تعریف گردید. در ادامه سه نوع شبکه‌بندی ریز، متوسط و درشت در نظر گرفته شد که پس از کالیبره مدل، شبکه‌بندی ریز با ابعاد مش ۲ سانتی‌متر انتخاب گردید. برای شرط مرزی با توجه به اندازه‌گیری عمق جریان در قسمت‌های مختلف کانال و مشخص بودن دبی ورودی در هر آزمایش، دبی و عمق بعنوان شرط مرزی ورودی، عمق جریان برای شرط مرزی انتهایی، شرایط Symmetry برای سطح آزاد سیال و شرط مرزی دیواره برای جداره‌ها انتخاب و شبیه‌سازی جریان متلاطم با سه مدل آشفتگی  $k-\varepsilon, RNG, LES$  انجام گرفت.

### کالیبراسیون مدل

کالیبراسیون براساس حل معادلات جریان به کمک مدل‌های آشفتگی و اندازه شبکه، صورت گرفته است، بدین صورت که مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Flow3D، براساس مدل‌های آشفتگی موجود و برای سه اندازه مش انجام گرفت. سپس نتایج هر کدام از شبیه‌سازی‌ها توسط روش‌های آماری زیر با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه و در نهایت مدلی که نزدیکترین نتایج را به مقادیر اندازه‌گیری شده داشته انتخاب گردید.

- ضریب همبستگی (Coefficient of Determination)

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n x_{ip} x_{im})^2}{\sum_{i=1}^n x_{ip}^2 \sum_{i=1}^n x_{im}^2} \quad (۳)$$

- مجموع مربع خطاها (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ip} - x_{im})^2}{n} \right]^{0.5} \quad (۴)$$

- متوسط مطلق خطاها (Mean Absolute Error)

$$\%Error = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{ip} - x_{im}|}{\sum_{i=1}^n x_{im}} \times 100 \quad (۵)$$

$n$ : تعداد داده‌ها

$X_{im}$ : مقادیر اندازه‌گیری شده

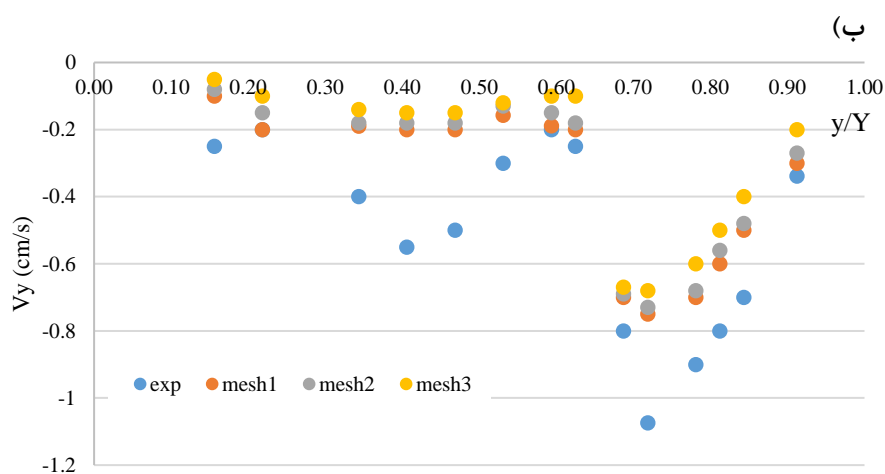
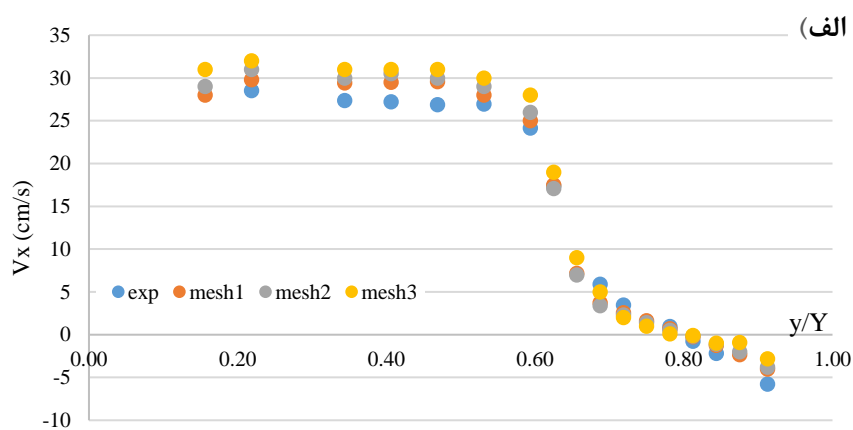
$X_{ip}$ : مقادیر محاسباتی

در رابطه با شبکه‌بندی مدل، سه اندازه اولیه در نظر گرفته شده و حساسیت سنجی انجام گرفت که مشخصات شبکه‌ها به همراه نتایج در جدول ۲ ارائه گردید. در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه سرعت‌های حاصل در مدل‌سازی شبکه‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در مقطع میانی خلیج آمده است.

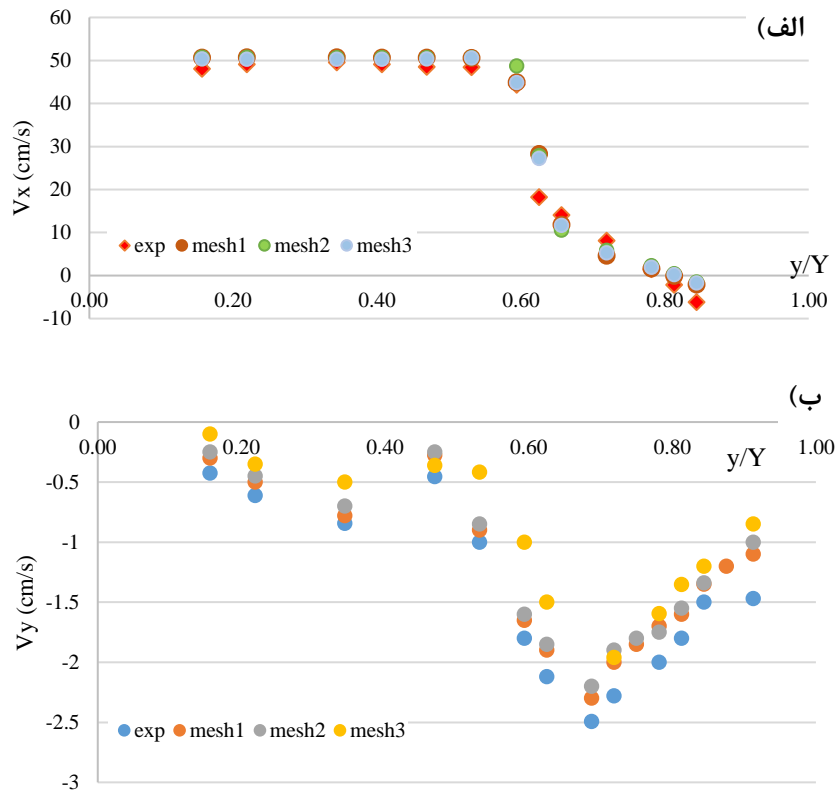
با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده و مقایسه سرعت حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی، شبکه‌بندی ریز انتخاب گردید. همانطور که مشخص است نتایج در حد قابل قبول بوده و ریزتر شدن شبکه موجب افزایش زمان محاسباتی می‌شود.

جدول ۲. آنالیز حساسیت شبکه‌بندی مدل

RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	تعداد	اندازه سلول (سانتی‌متر)	راستا	نوع مش
۲/۹۷	۲/۴۵	۰/۹۵	۱۴۴	۲	x	ریز type 1
			۴۸	۲	y	
			۲۳	۲	z	
۳/۰۵	۲/۶۳	۰/۹۴	۱۱۴	۲/۵	x	متوسط type 2
			۳۸	۲/۵	y	
			۲۳	۲	z	
۳/۲۶	۲/۶۴	۰/۹۴	۹۵	۳	x	درشت type 3
			۳۲	۳	y	
			۱۸	۲/۵	z	



شکل ۴. آنالیز حساسیت ابعاد شبکه برای دبی ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه (الف) مقایسه سرعت طولی (ب) سرعت عرضی



شکل ۵. آنالیز حساسیت ابعاد شبکه برای دبی  $+0.33$  مترمکعب بر ثانیه (الف) مقایسه سرعت طولی (ب) سرعت عرضی

جدول ۳ نشان می‌دهد روش RNG برای این مدل‌سازی مناسب‌تر بوده و نتایج بدست آمده هماهنگی بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. ( $V_x, V_y$  مقدار پارامتر آماری مدنظر برای سرعت در راستای محورهای X, Y و AVE میانگین آن‌ها می‌باشد)

جدول ۳. مقایسه نتایج مدل‌های آشفته‌گی

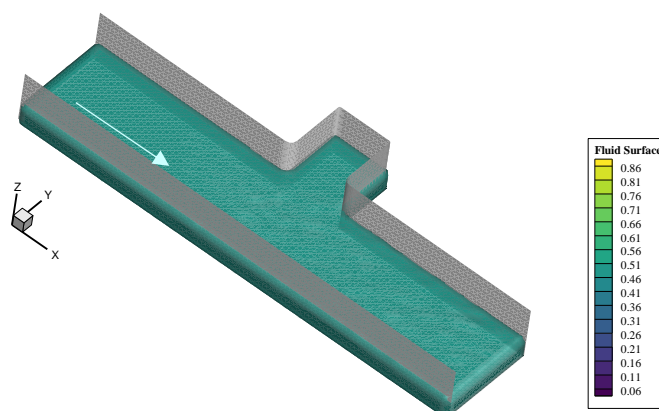
مدل آشفته‌گی	RMSE			MAE			R <sup>2</sup>		
	AVE	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	AVE	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	AVE	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>
k-e	۳/۲۴	۳/۵۲	۲/۹۷	۲/۷۰	۳/۰۶	۲/۳۴	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۸
Rng	۲/۹۸	۲/۳۷	۲/۵۸	۲/۵۳	۲/۹۳	۲/۱۳	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۸
LES	۳/۶۷	۳/۵۴	۳/۸۱	۲/۹۸	۳/۰۷	۲/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۸

## نتایج و بحث

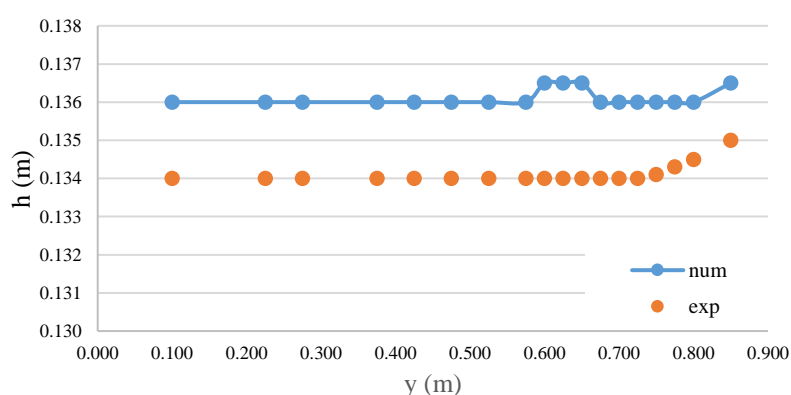
### تغییرات عمق جریان

در شکل ۶ عمق جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی بصورت سه بعدی برثانیه آمده است. در شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه عمق حاصل از مدل عددی با اندازه‌گیری‌های انجام شده در مدل فیزیکی آمده است. اختلاف بین سطح آب در مدل عددی و مدل فیزیکی بسیار ناچیز می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد عمق جریان در محدوده اتصال خلیج میانی به کانال اصلی دارای نوسانات کمی می‌باشد که با توجه به کوچک بودن و وجود خطاهای اندازه‌گیری در آزمایشگاه مشهود نبوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد عمق جریان در دیواره متصل به خلیج اندکی افزایش می‌یابد که این رخداد به دلیل وجود حلقه چرخش ایجاد شده در محدوده خلیج میانی می‌باشد.

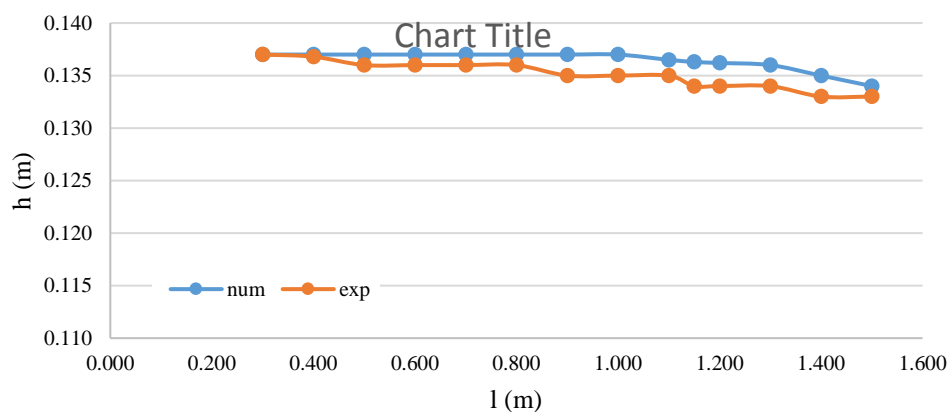




شکل ۶. نمایش سه بعدی عمق جریان در مدل عددی برای دبی  $0.33 \pm$  مترمکعب برثانیه



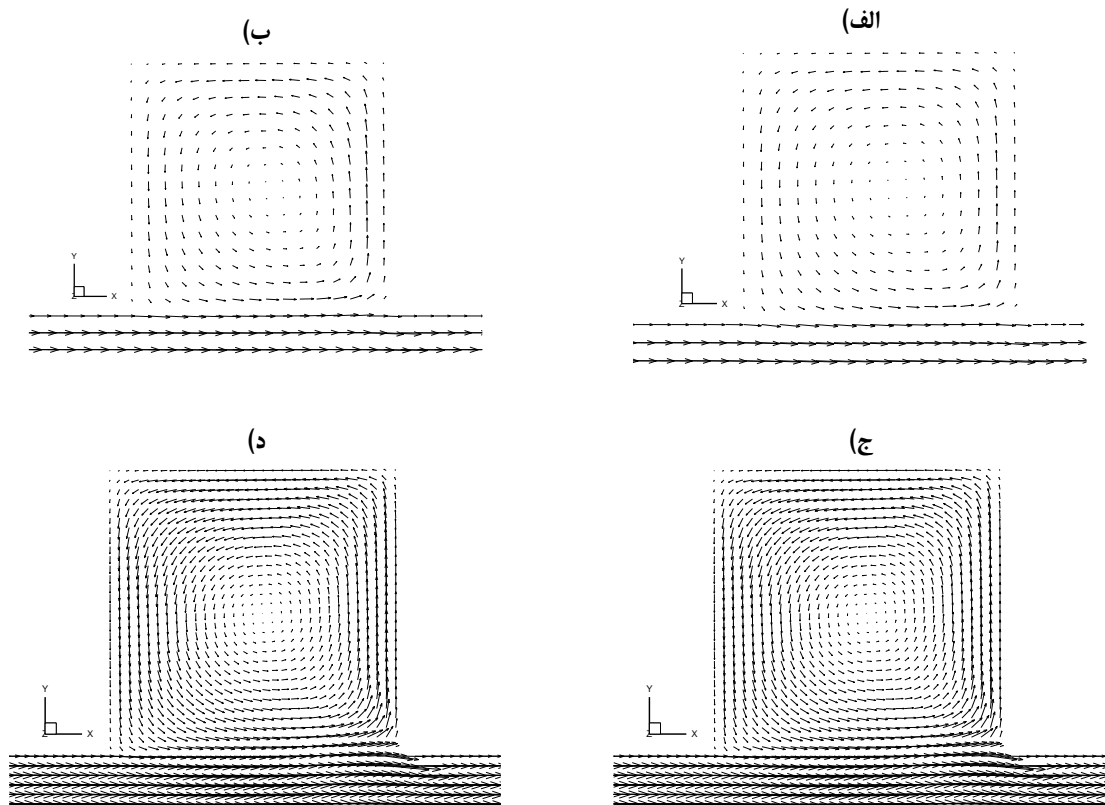
شکل ۷. تغییرات عرضی عمق جریان در مقطع میانی خلیج



شکل ۸. پروفیل طولی عمق جریان در راستای کانال اصلی

### بررسی الگوی جریان

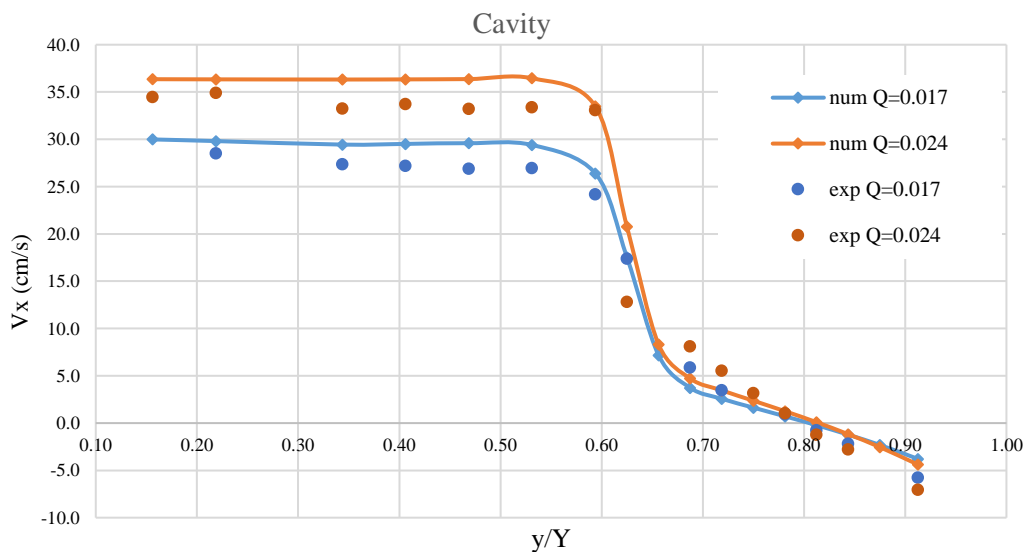
یک چرخه آب که ناشی از اختلاف منتمم بین خلیج و رودخانه است در درون خلیج تشکیل می‌یابد. مرکز این چرخه تقریباً در قسمت مرکزی خلیج واقع شده است. نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی وجود یک سیکل گردشی در خلیج مورد مطالعه را نشان می‌دهد که مطابق با نتایج ارائه شده در مطالعات Gaskin et al (2002)، Akutina et al (2014)، Engelen & Mulder (2020) می‌باشد (شکل ۹). Gaskin و همکاران در مطالعات خود با تزریق ماده رنگی در یک خلیج میانی مشاهداتی مبنی بر وجود نوارهای چرخشی و سیکل گردش داشته‌اند. داده‌های مطالعات Akutina et al و Engelen & Mulder که با استفاده از سرعت‌سنجی تصویری بوده، نیز وجود سیکل گردش در خلیج میانی را بصورت کمی ارائه نموده است.



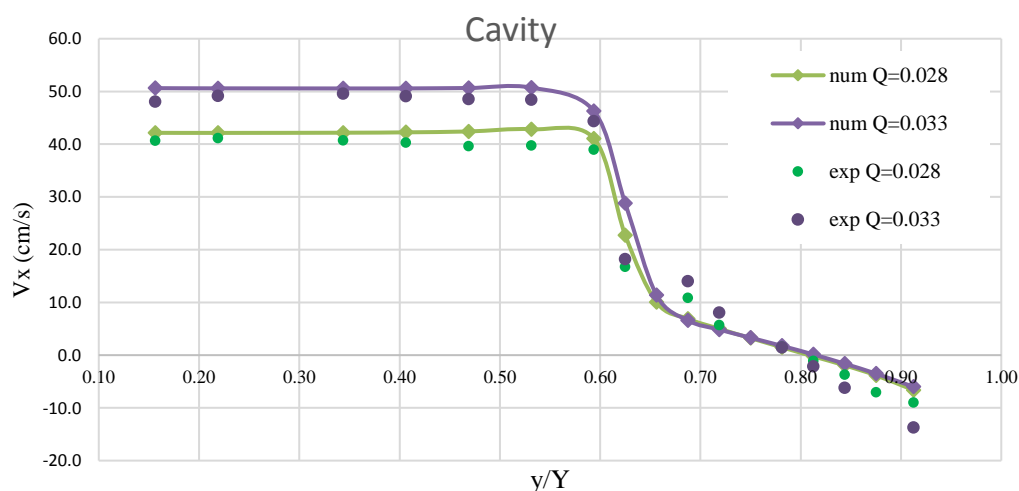
شکل ۹. الگوی جریان در خلیج میانی در دبی‌های مختلف: الف) ۰/۰۱۷، ب) ۰/۰۲۴، ج) ۰/۰۲۸، د) ۰/۰۳۳ مترمکعب بر ثانیه

#### بررسی سرعت طولی $V_x$

با توجه به اینکه سرعت طولی در واقع سرعت در جهت حرکت جریان می‌باشد، بدیهی است در مقایسه با سرعت عرضی و عمقی، بزرگی بیشتری داشته و تغییرات سرعت کل متاثر از سرعت طولی می‌باشد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه نتایج مدل عددی و سرعت‌های طولی اندازه‌گیری شده در مقطع میانی خلیج آمده است که مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

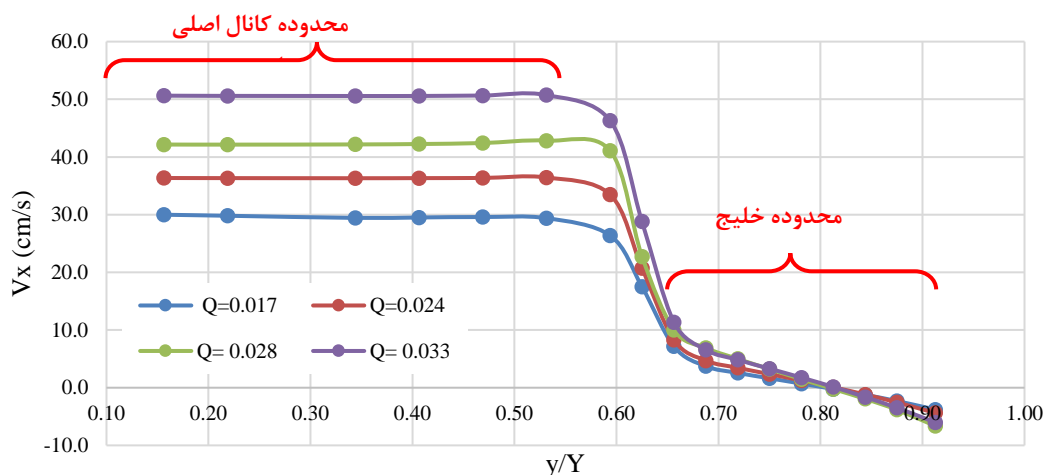


شکل ۱۰. مقایسه سرعت طولی در مقطع مرکزی خلیج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های ۰/۰۱۷ و ۰/۰۲۴ مترمکعب بر ثانیه

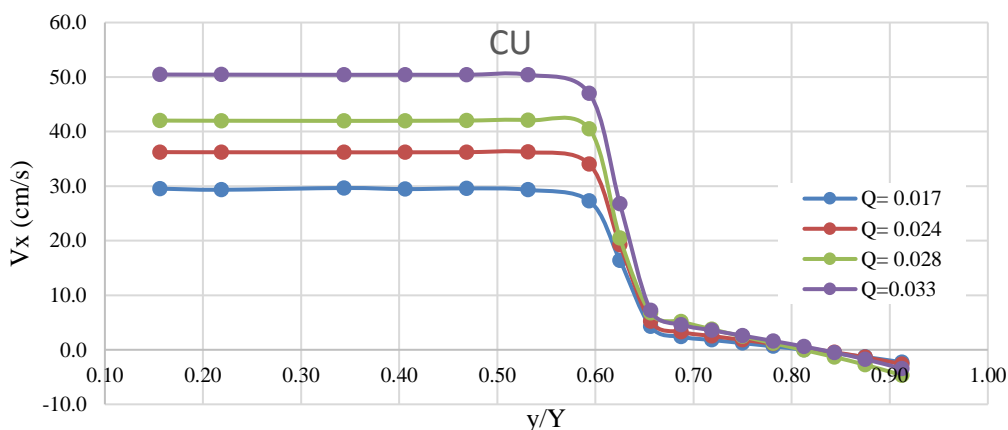


شکل ۱۱. مقایسه سرعت طولی در مقطع مرکزی خلیج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های ۰/۰۲۸ و ۰/۰۳۳ مترمکعب بر ثانیه

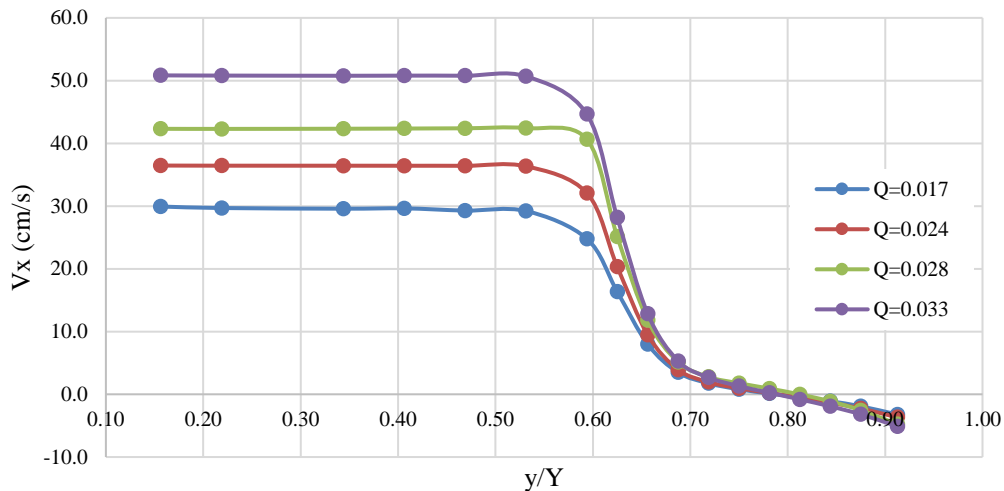
همانطور که در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مشخص است، سرعت طولی در ورود به محدوده خلیج میانی و در گذر از لایه برشی، به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. در محدوده مرکز خلیج شاهد تغییر جهت سرعت طولی می‌باشیم. با افزایش مقدار جریان در یک عمق ثابت، در محدوده خلیج میانی نیز، اندازه سرعت طولی (بدون در نظر گرفتن جهت) بیشتر می‌شود. به عبارتی با افزایش جریان در کانال اصلی، میزان بیشتری از جریان به سمت خلیج انحراف یافته و سرعت در خلیج میانی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. تغییرات سرعت طولی  $V_x$  در مقطع مرکزی خلیج با افزایش دبی در عمق ثابت

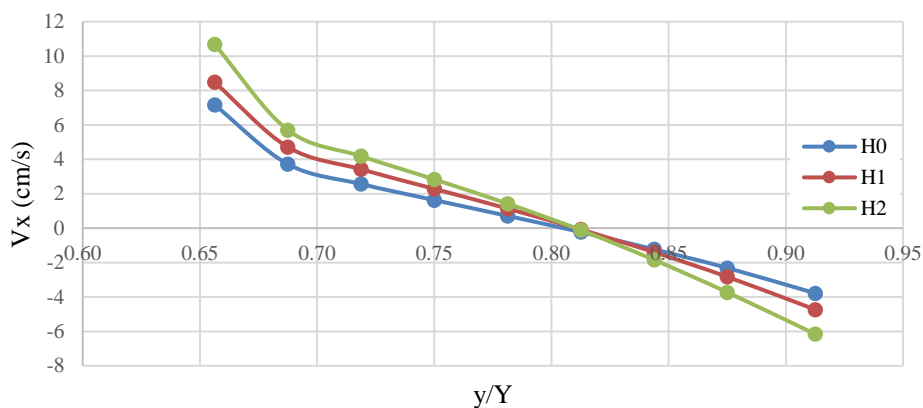


شکل ۱۳. تغییرات سرعت طولی  $V_x$  در مقطع ۱/۴ ابتدایی خلیج با افزایش دبی در عمق ثابت

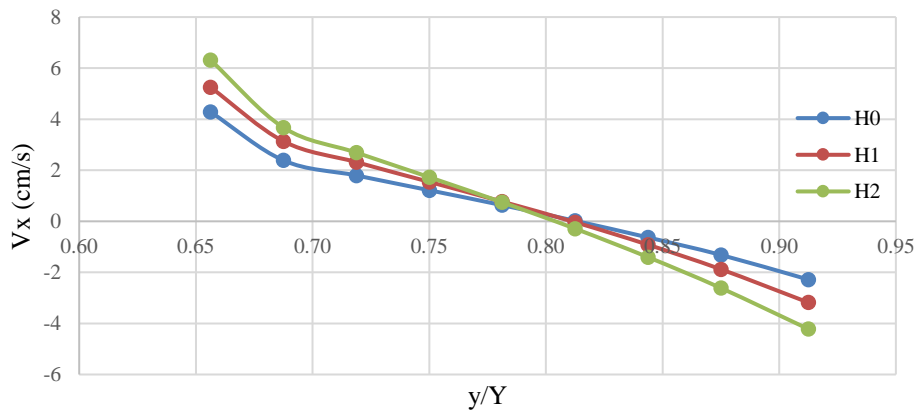


شکل ۱۴. تغییرات سرعت طولی  $V_x$  در مقطع ۳/۴ انتهایی خلیج با افزایش دبی در عمق ثابت

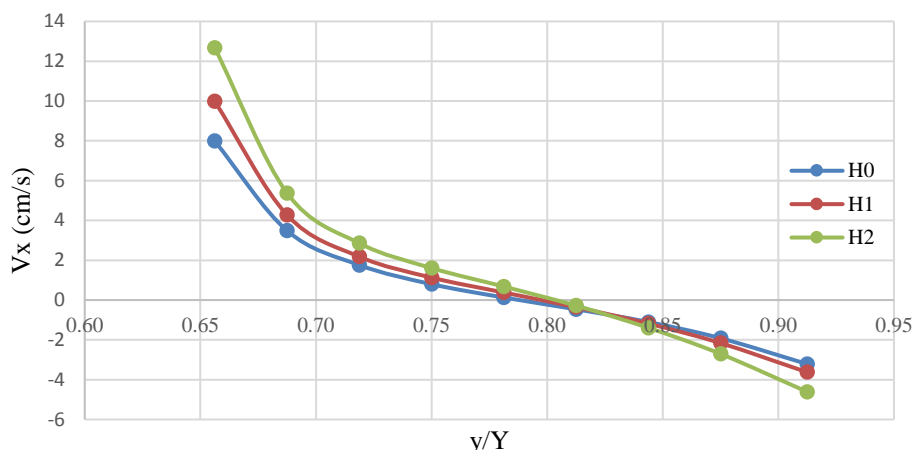
در ادامه برای بررسی تاثیر عمق، با در نظر گرفتن دبی‌های ثابت، عمق جریان به میزان ۲۰٪ و ۴۰٪ کاهش یافته و مدل اجرا گردید. همانطور که در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ مشاهده می‌شود، در یک دبی ثابت با کاهش عمق جریان در کانال اصلی ( $H_0=0.145\text{m}$ ,  $H_1=0.116\text{m}$ ,  $H_2=0.087\text{m}$ )، سرعت در کانال اصلی زیاد شده و به همین تناسب اندازه سرعت طولی صرف نظر از جهت آن در محدوده خلیج نیز افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد عمق جریان در بالادست کانال اصلی و همچنین سرعت در کانال اصلی بر اندازه سرعت در خلیج میانی تاثیر مستقیم دارد.



شکل ۱۵. تغییرات سرعت طولی  $V_x$  در مقطع مرکزی خلیج با کاهش عمق در دبی ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه



شکل ۱۶. تغییرات سرعت طولی  $V_x$  در مقطع ۱/۴ ابتدایی خلیج با کاهش عمق در دبی ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه

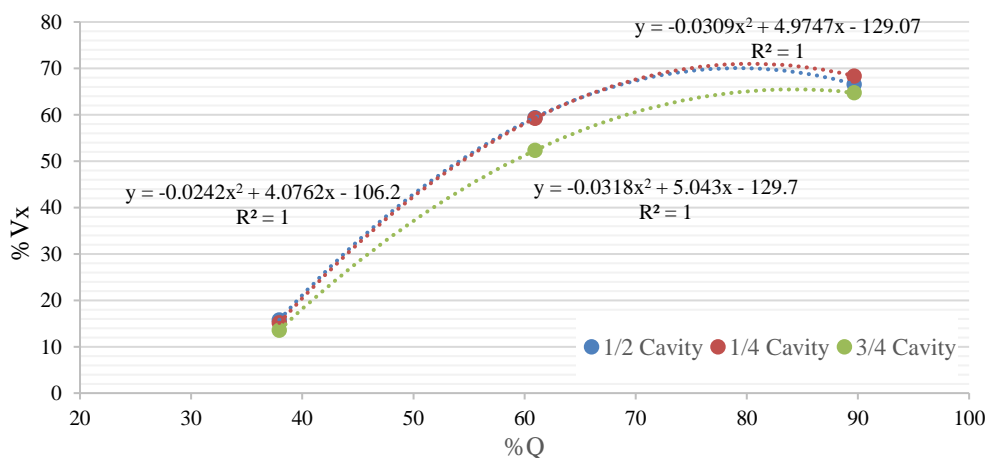


شکل ۱۷. تغییرات سرعت طولی  $V_x$  در مقطع ۳/۴ انتهایی خلیج با کاهش عمق در دبی ۰/۰۱۷ مترمکعب برثانیه

همانطور که شکل‌های ۱۲ الی ۱۷ نشان می‌دهد، سرعت طولی در محدوده خلیج میانی دارای تقارن بوده و هسته چرخش در مرکز خلیج قرار دارد. سرعت طولی از مقدار ماکزیمم مثبت در لایه برشی مجاور با کانال اصلی به مقدار مینیمم منفی در ساحل چپ و دیواره صلب در مجاورت خلیج می‌رسد. برای بررسی اثر کمی افزایش دبی کانال اصلی بر سرعت طولی خلیج میانی، میزان تغییرات در نقطه‌ای به فاصله‌ای به عرض  $y=0/83$  از ساحل راست کانال اصلی که تقریباً دارای بیشترین سرعت طولی منفی می‌باشد در سه مقطع خلیج طی جدول ۴ و شکل ۱۸ آمده است.

جدول ۴. درصد افزایش سرعت طولی به ازای افزایش دبی (دبی بر حسب مترمکعب برثانیه، سرعت بر حسب متر برثانیه)

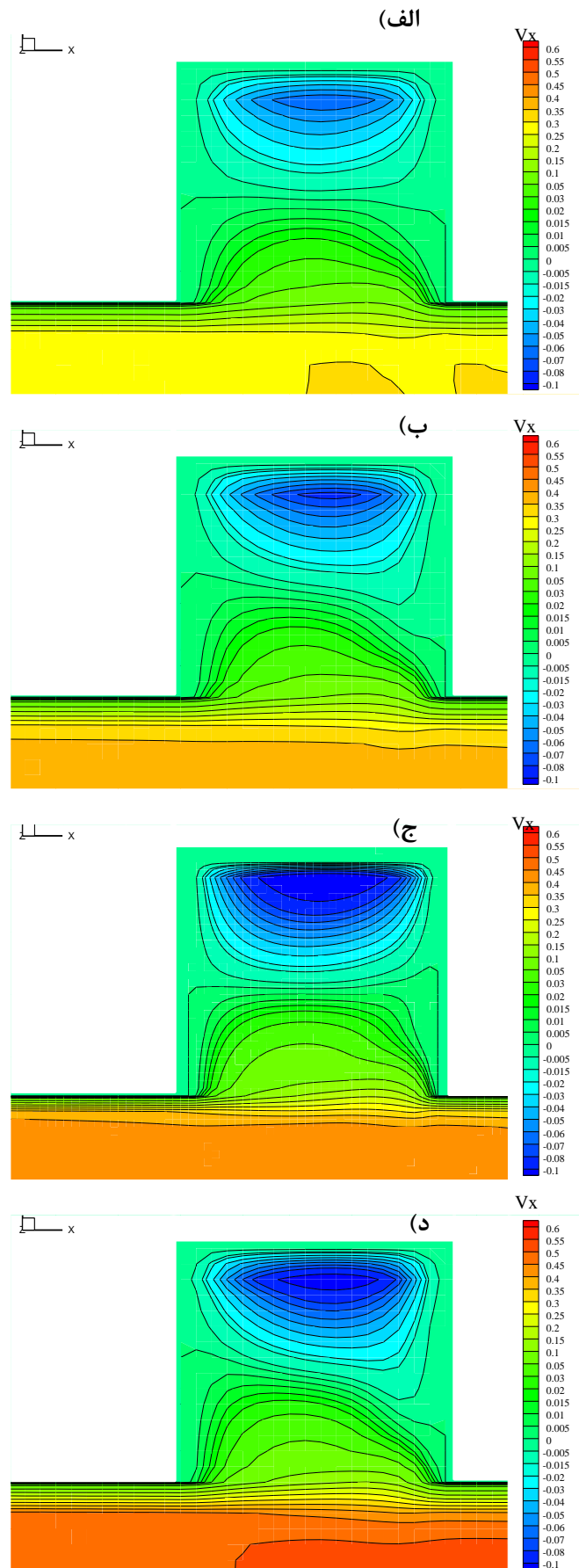
درصد دبی اولیه	دبی ثانویه	مقطع ۱/۴ ابتدایی			مقطع میانی			مقطع ۳/۴ انتها		
		سرعت طولی اولیه	سرعت طولی ثانویه	درصد افزایش سرعت طولی	سرعت طولی اولیه	سرعت طولی ثانویه	درصد افزایش سرعت طولی	سرعت طولی اولیه	سرعت طولی ثانویه	درصد افزایش سرعت طولی
۰/۰۱۷	۰/۰۲۴	-۰/۰۲۳	-۰/۰۲۶	۱۵/۱۳	-۰/۰۳۸	-۰/۰۴۴	۱۵/۷۹	-۰/۰۳۲	-۰/۰۳۷	۱۲/۶۰
۰/۰۱۷	۰/۰۲۸	-۰/۰۲۳	-۰/۰۳۶	۵۹/۲۱	-۰/۰۳۸	-۰/۰۶۰	۵۹/۳۸	-۰/۰۳۲	-۰/۰۴۹	۵۲/۳۲
۰/۰۱۷	۰/۰۳۳	-۰/۰۲۳	-۰/۰۳۸	۶۸/۲۵	-۰/۰۳۸	-۰/۰۶۳	۶۶/۵۷	-۰/۰۳۲	-۰/۰۵۳	۶۴/۷۵



شکل ۱۸. میزان افزایش سرعت طولی خلیج میانی به ازای افزایش دبی در کانال اصلی (نقاط  $x=1.15, y=0.83$  و  $x=1.07, y=0.83$  و  $x=1.23, y=0.83$ )

در شکل ۱۹ توزیع دوبعدی سرعت طولی در تراز ۰/۶ عمق برای دبی‌های مختلف آمده است. همانطور که در پلان دوبعدی مشخص است سرعت طولی ( $V_x$ ) در خلیج میانی شامل دو ناحیه مثبت و منفی می‌باشد که با افزایش دبی، اختلاف سرعت طولی در نیمه داخلی و خارجی خلیج

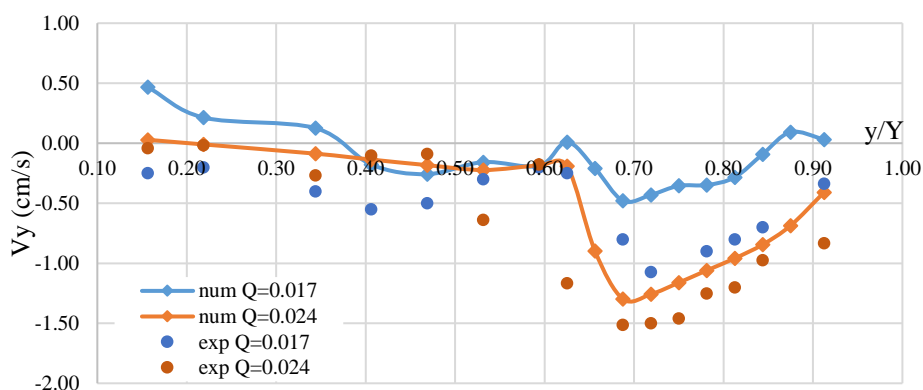
بیشتر می‌شود، به عبارتی با افزایش دبی در کانال اصلی، بزرگی سرعت حلقه چرخش در خلیج میانی نیز افزایش می‌یابد.



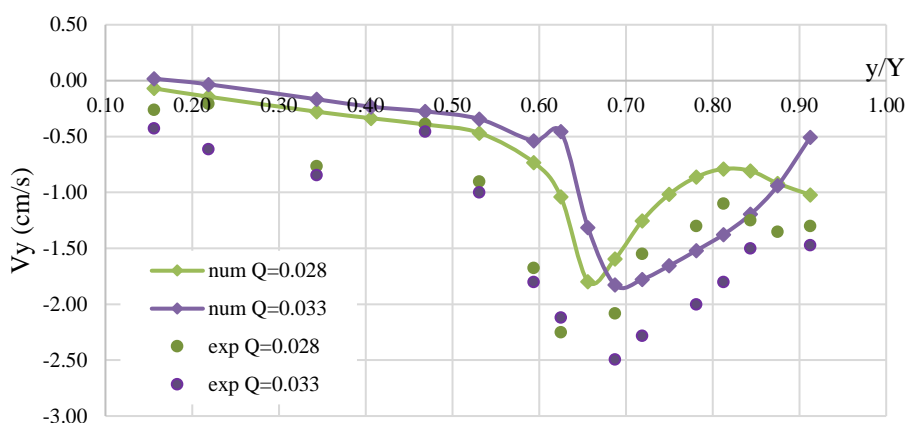
شکل ۱۹. توزیع دوبعدی سرعت طولی در تراز ۰.۶ عمق به ازای دبی الف) ۰/۰۱۷ (ب) ۰/۰۲۳ (ج) ۰/۰۲۸ (د) ۰/۰۳۳ مترمکعب بر ثانیه

بررسی سرعت عرضی  $V_y$ 

مقایسه سرعت‌های عرضی حاصل از مدل عددی Flow3D و نتایج آزمایشگاهی در مقطع میانی خلیج در شکل ۲۰ و ۲۱ آمده است که نشان‌دهنده توانمندی مدل عددی در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در خلیج میانی می‌باشد.

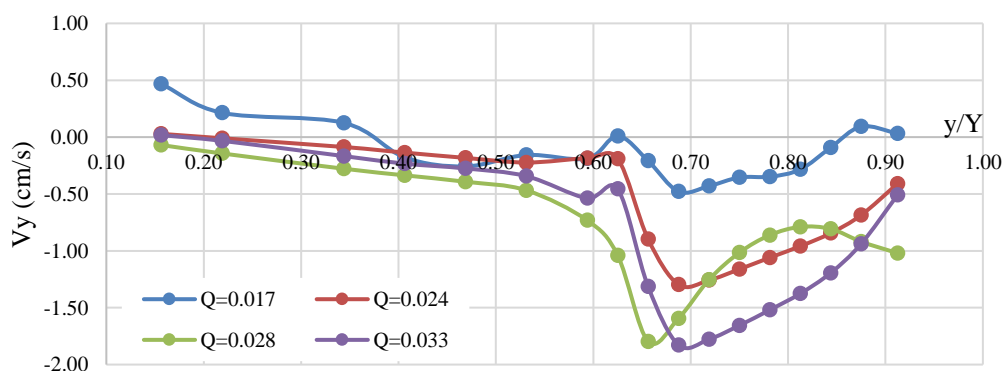


شکل ۲۰. مقایسه سرعت عرضی در مقطع مرکزی خلیج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های  $0.17/0+$  و  $0.24/0+$  مترمکعب بر ثانیه

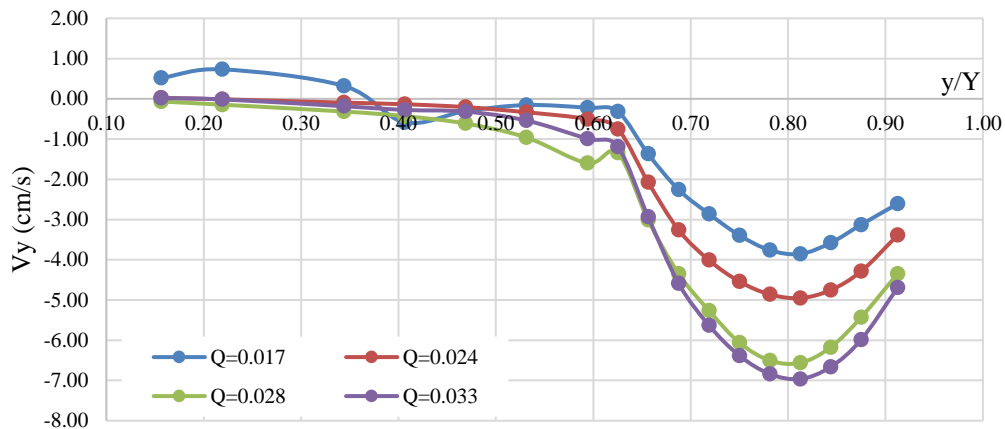


شکل ۲۱. مقایسه سرعت عرضی در مقطع مرکزی خلیج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های  $0.28/0+$  و  $0.33/0+$  مترمکعب بر ثانیه

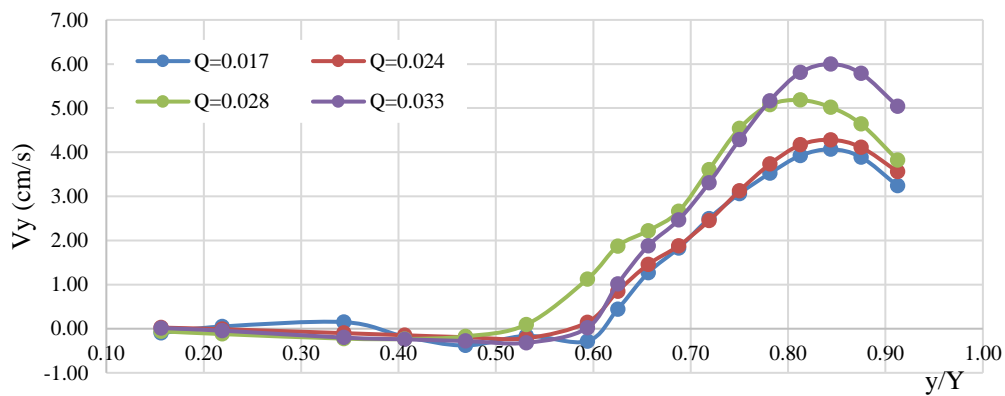
در شکل‌های ۲۲ الی ۲۴ تغییرات سرعت عرضی در محدوده خلیج میانی با تغییر دبی در عمق ثابت آمده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد، در یک عمق ثابت، با افزایش دبی ورودی سرعت عرضی نیز همانند سرعت طولی در کانال اصلی و محدوده خلیج افزایش می‌یابد. سرعت عرضی در مقطع  $1/4$  ابتدایی و مقطع مرکزی خلیج دارای جهت منفی، در مقطع  $3/4$  انتهایی خلیج مثبت می‌باشد. با در نظر گرفتن سوی مثبت محور  $Y$  به سمت انتهای خلیج (ساحل چپ کانال)، این پدیده نشان‌دهنده حرکت چرخشی پادساعتگرد خطوط جریان در محدوده داخلی خلیج میانی می‌باشد.



شکل ۲۲. تغییرات سرعت عرضی  $V_y$  در مقطع مرکزی خلیج با افزایش دبی در عمق ثابت

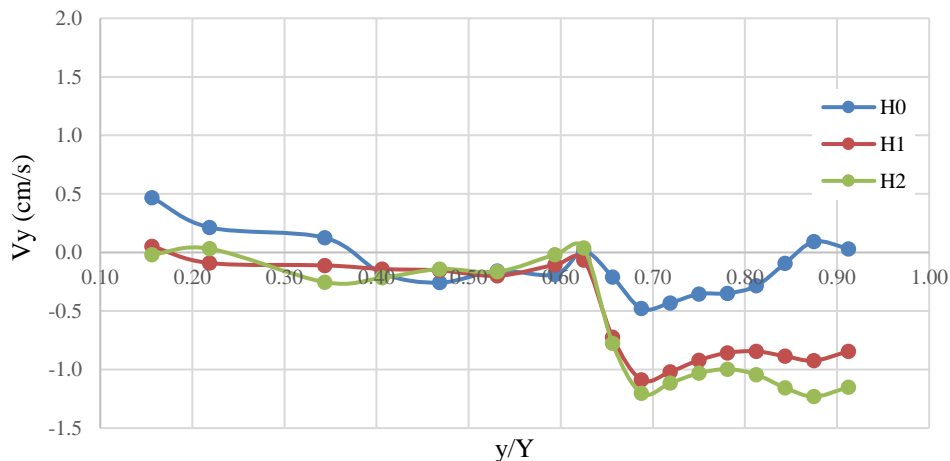


شکل ۲۳. تغییرات سرعت عرضی  $V_y$  در مقطع ۱/۴ ابتدایی خلیج با افزایش دبی در عمق ثابت



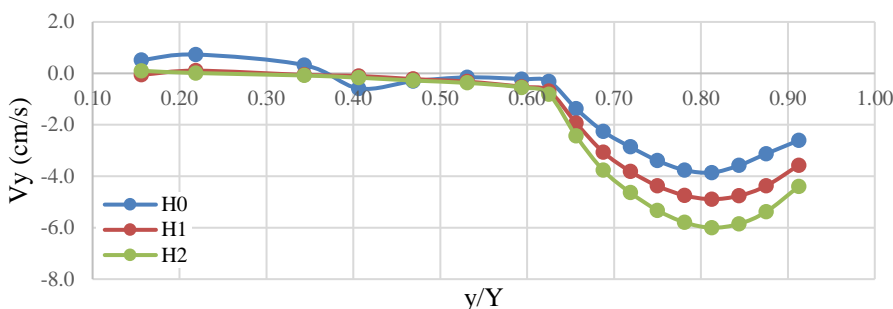
شکل ۲۴. تغییرات سرعت عرضی  $V_y$  در مقطع ۳/۴ انتهایی خلیج با افزایش دبی در عمق ثابت

در ادامه برای بررسی تاثیر عمق، با در نظر گرفتن دبی‌های ثابت، عمق جریان به میزان ۲۰٪ و ۴۰٪ کاهش یافته و مدل اجرا گردید. همانطور که در شکل‌های ۲۵ تا ۲۷ مشاهده می‌شود، در یک دبی ثابت با کاهش عمق جریان در کانال اصلی ( $H_0=0.145m$ ,  $H_1=0.116m$ ,  $H_2=0.087m$ )، سرعت در کانال اصلی زیاد شده و به همین تناسب اندازه سرعت عرضی نیز صرف نظر از جهت آن در محدوده خلیج نیز افزایش می‌یابد.

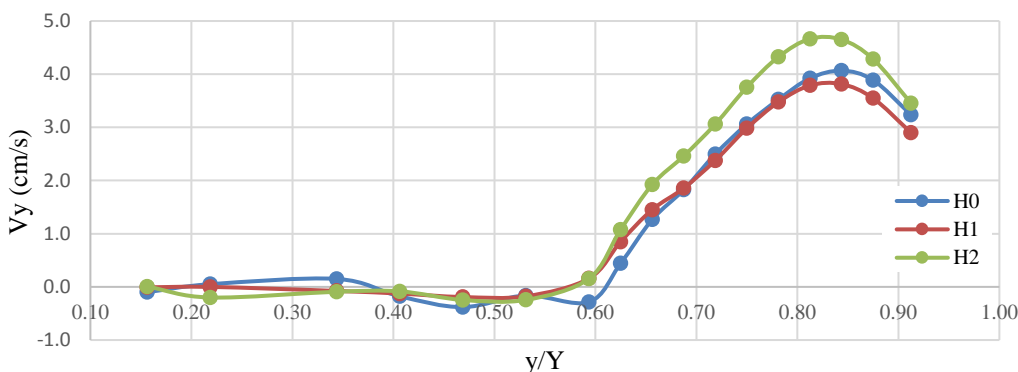


شکل ۲۵. تغییرات سرعت عرضی  $V_y$  در مقطع مرکزی خلیج با کاهش عمق در دبی ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه





شکل ۲۶. تغییرات سرعت عرضی Vy در مقطع ۱/۴ ابتدایی خلیج با کاهش عمق در دبی ۰/۱۷ مترمکعب برثانیه

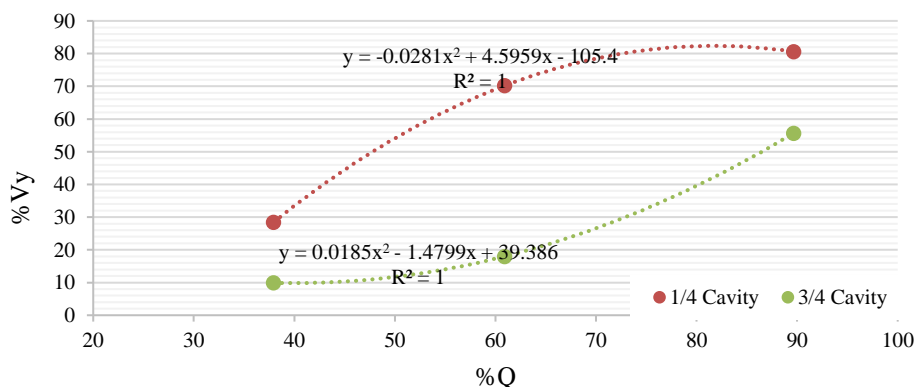


شکل ۲۷. تغییرات سرعت عرضی Vy در مقطع ۳/۴ انتهایی خلیج با کاهش عمق در دبی ۰/۱۷ مترمکعب برثانیه

در جدول ۵ و شکل ۲۸ میزان درصد افزایش سرعت عرضی به ازای افزایش دبی در عمق ثابت آمده است. با توجه به اینکه ماکزیمم سرعت عرضی در فاصله عرضی میانه خلیج رخ می‌دهد و در مقطع مرکزی خلیج، هسته گردش تشکیل شده و سرعت بسیار ناچیز می‌باشد، مقایسه برای مقاطع یک چهارم ابتدایی و سه چهارم انتهایی و در فاصله ای به عرض  $y=0/75$  از ساحل راست انجام گردید.

جدول ۵. درصد افزایش سرعت عرضی به ازای افزایش دبی (دبی بر حسب مترمکعب برثانیه، سرعت بر حسب متربرثانیه)

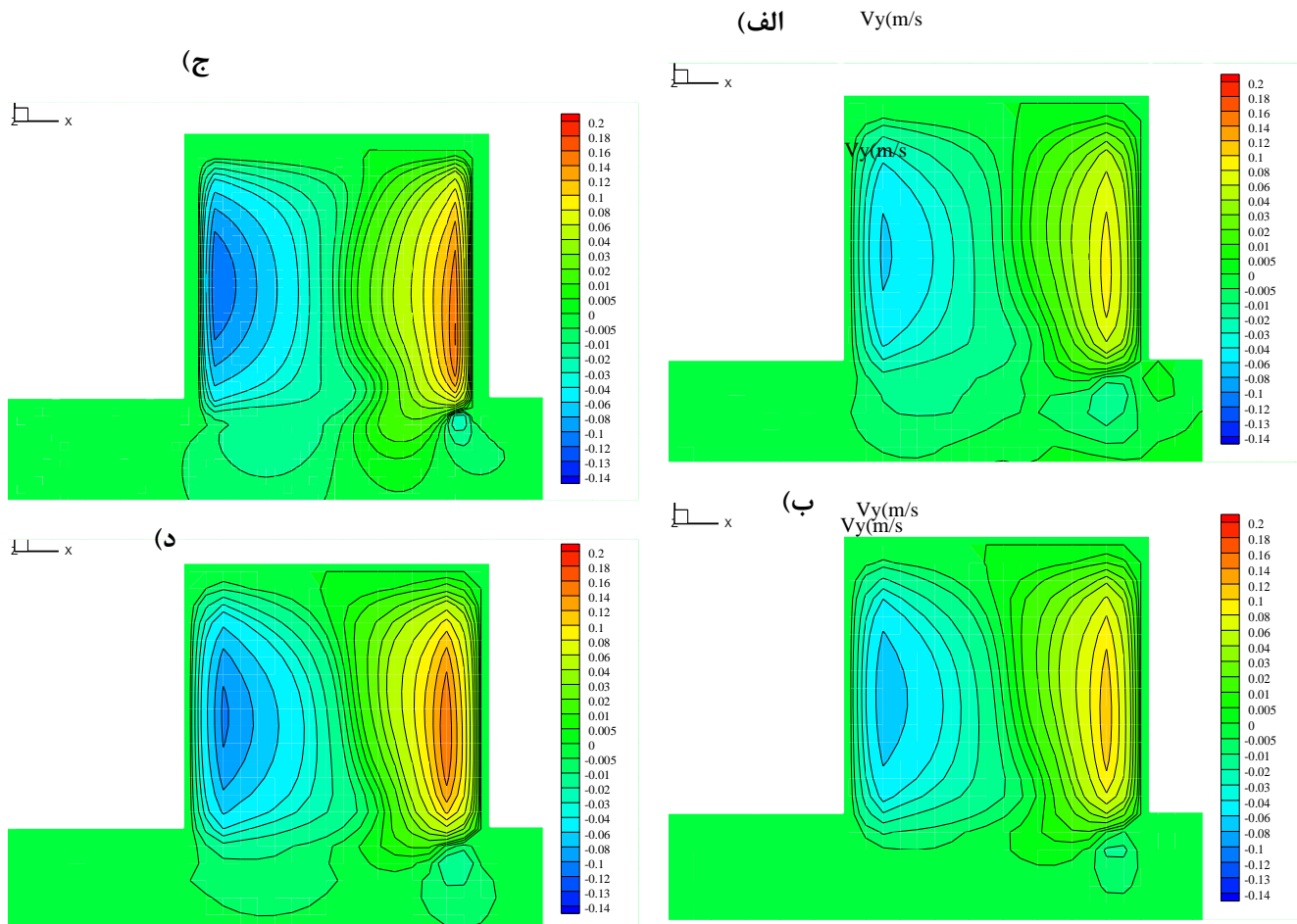
دبی اولیه	دبی ثانویه	درصد افزایش دبی	مقطع ۱/۴ ابتدایی		مقطع ۳/۴ انتها	
			سرعت عرضی اولیه	سرعت عرضی ثانویه	سرعت عرضی اولیه	سرعت عرضی ثانویه
۰/۱۷	۰/۲۴	۳۷/۹۳	-۰/۰۳۹	-۰/۰۵۰	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶
۰/۱۷	۰/۲۸	۶۰/۹۲	-۰/۰۳۹	-۰/۰۶۶	۰/۰۳۲	۰/۰۳۸
۰/۱۷	۰/۳۳	۸۹/۶۶	-۰/۰۳۹	-۰/۰۷۰	۰/۰۳۲	۰/۰۵۰



شکل ۲۸. میزان افزایش سرعت عرضی خلیج میانی به ازای افزایش دبی در کانال اصلی (نقاط  $x=1.23, y=0.75$  و  $x=1.07, y=0.75$ )

در شکل ۲۹ توزیع دوبعدی سرعت عرضی در تراز ۰/۶ عمق برای دبی‌های مختلف آمده است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد جریان از پایین دست وارد حفره خلیج شده و با چرخش خارج می‌شود. در نیمه ابتدایی خلیج سرعت عرضی مثبت می‌باشد. همچنین با افزایش دبی در کانال

اصلی، اختلاف سرعت عرضی در محدوده خلیج نیز بیشتر می‌گردد. Navas-Montilla و همکاران در سال ۲۰۱۹ که در پژوهش خود به شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مقیاس با استفاده از مدل WENO-ADER پرداختند نیز در نتایج خود روند مشابهی از تغییرات سرعت عرضی ارائه نمودند. ایشان در پژوهش خود از آزمایش‌هایی در خلیج میانی به ابعاد  $15 \times 15$  و  $15 \times 22/5$  سانتیمتر، عمق آب ۱ و ۲ سانتیمتر در دبی‌های  $0/255$  و  $0/747$  لیتر بر ثانیه بهره جستند.



شکل ۲۹. توزیع دوبعدی سرعت عرضی در تراز  $0/6$  عمق به ازای دبی الف ( $0/17$  ب)  $0/23$  ج)  $0/28$  د)  $0/33$  مترمکعب بر ثانیه

### شدت آشفتگی جریان

یک جریان آشفته دارای طبیعتی سه بعدی و غیر دائمی است. حرکت بسته‌های سیال در چنین جریانی تابع گردابه‌هایی است که در ابعاد مختلف تشکیل شده و سپس مستهلک می‌شوند و به این دلیل مشخصه‌های جریان، دارای نوسانات لحظه‌ای می‌باشند. با گذر جریان از یک نقطه، وجود گردابه‌های بزرگ و کوچک می‌تواند باعث تولید نوسانات سرعت کم یا زیاد در جریان سیال گردد. در این گونه جریان‌ها، سرعت لحظه‌ای و سایر پارامترها مطابق روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$u = \bar{u} + \hat{u} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$v = \bar{v} + \hat{v} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$w = \bar{w} + \hat{w} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در این روابط  $u, v, w$  سرعت لحظه‌ای در راستای  $x, y, z$ ،  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$  مقادیر نوسانات سرعت،  $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$  متوسط‌های زمانی سرعت می‌باشند. متوسط نوسانات آشفتگی به صورت جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت یا  $RMS = \sqrt{\hat{u}^2}$  تعریف می‌شود که این پارامتر می‌تواند تصویر واضح‌تری از میزان نوسانات سرعت را نشان دهد. جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت از طریق روابط ۹ الی ۱۱ نیز محاسبه می‌گردد.

$$u_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$v_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$w_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

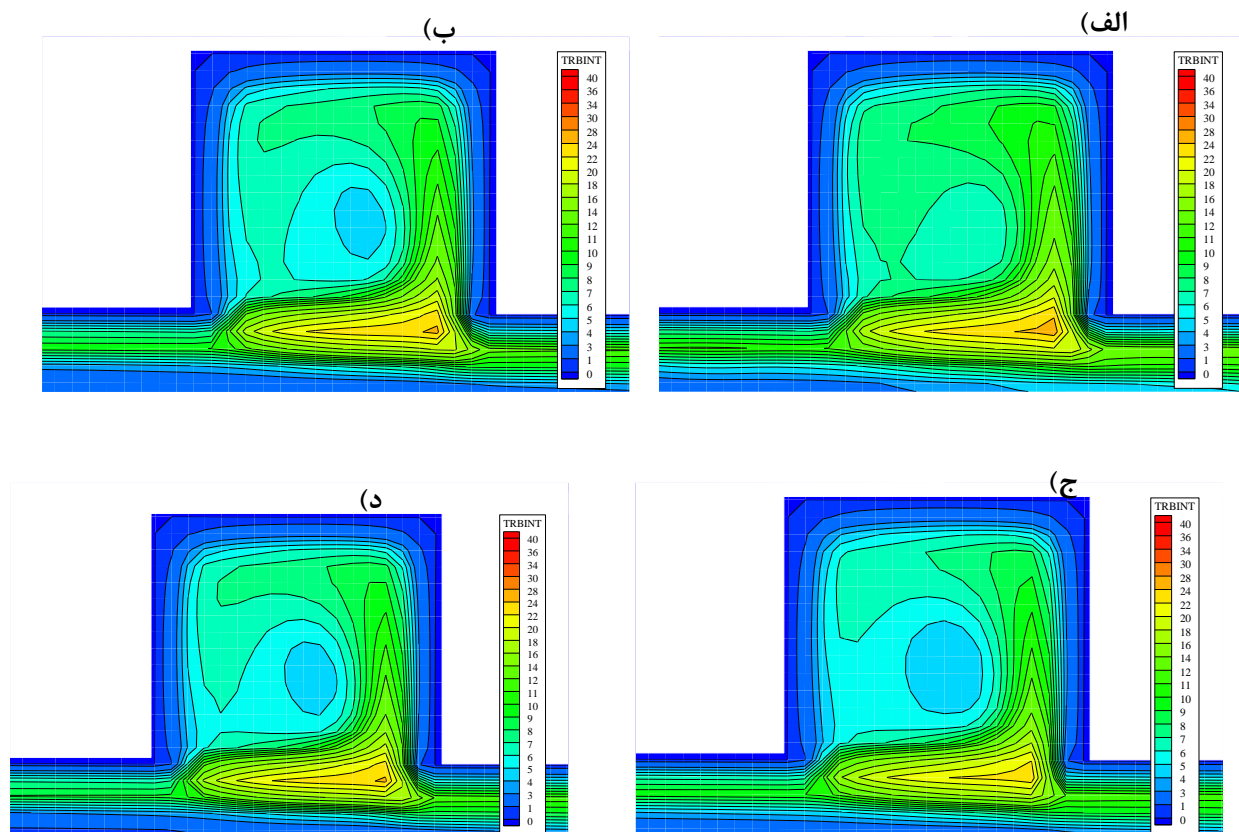
پارامتر شدت آشفتگی نسبی که برای بیان میزان نوسانات آشفتگی به کار می‌رود مطابق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{u} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

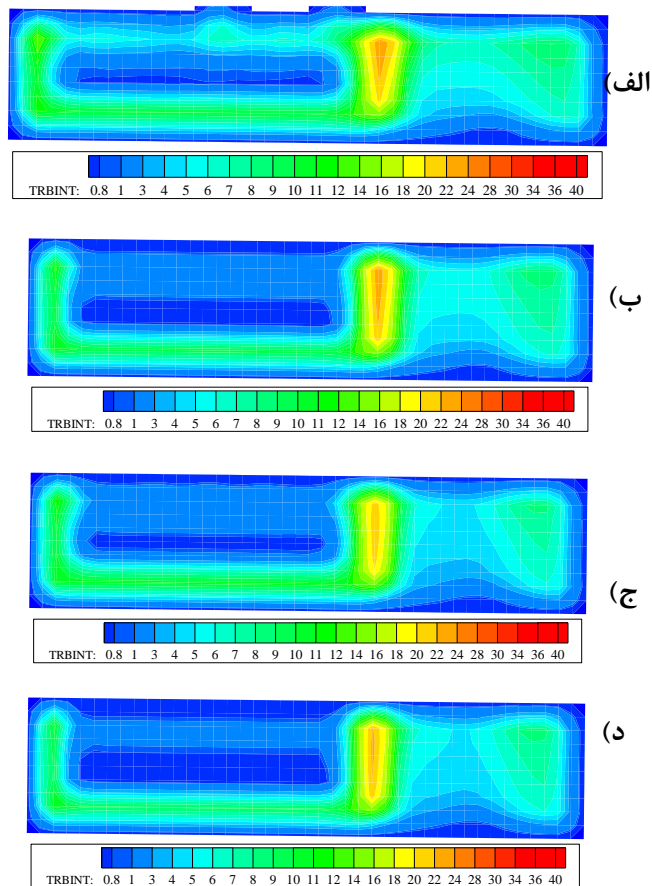
$$\hat{v} = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{\bar{v}} = \frac{v_{rms}}{\bar{v}} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\hat{w} = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{\bar{w}} = \frac{w_{rms}}{\bar{w}} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

همانطور که در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ مشاهده می‌شود، شدت آشفتگی مطابق با حلقه چرخش درون خلیج می‌باشد. با افزایش دبی شدت آشفتگی کاهش می‌یابد در واقع هنگامی که جریان در کانال اصلی کمتر است برای ورود به محدوده خلیج میانی، بیشتر تحت تاثیر تغییر مسیر قرار گرفته و شدت آشفتگی‌ها بیشتر خواهد بود. پلان سطحی و عمقی نشان می‌دهد حداکثر آشفتگی‌ها در لایه مرزی که مابین جریان اصلی و خلیج میانی قرار دارد و همچنین در بستر و مجاورت دیواره‌ها تشکیل می‌شود. در هسته چرخش نیز کمترین شدت آشفتگی رخ می‌دهد.



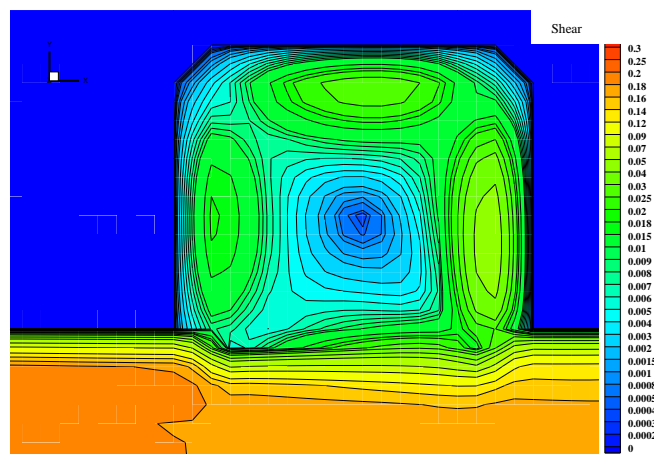
شکل ۳۰. شدت آشفتگی جریان در ۰/۶ عمق در دبی الف (۰/۱۷ ب) ۰/۲۳ ج) ۰/۲۸ د) ۰/۳۳ مترمکعب بر ثانیه



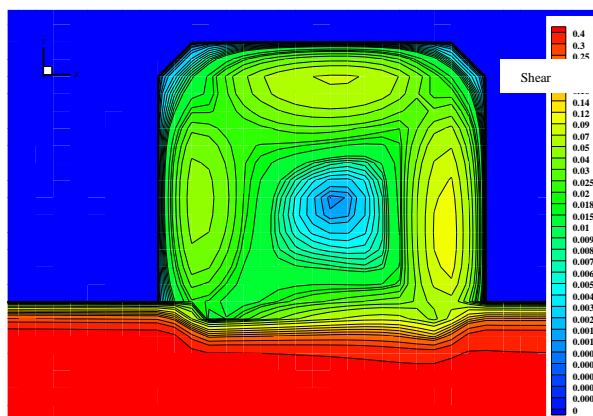
شکل ۳۱. شدت آشفته‌گی عمقی جریان در مرکز خلیج در دبی الف)  $0/017$  (ب)  $0/023$  (ج)  $0/028$  (د)  $0/033$  مترمکعب بر ثانیه

### بررسی الگوی تنش برشی

با توجه به اینکه محدوده‌های دارای بیشترین تنش برشی مناطق آسیب پذیرتر در مقابل فرسایش بستر و نواحی با تنش برشی کم، مناطق مناسب‌تر برای رسوبگذاری هستند در این بخش به بررسی الگوی توزیع تنش برشی پرداخته شده است. روند کلی الگوی تنش برشی تقریباً مشابه با الگوی توزیع سرعت می‌باشد. بدین صورت که با توجه به اختلاف بالای سرعت در کانال اصلی و خلیج میانی، در ابتدای ورود به خلیج، لایه ای با تنش برشی بالا بوجود می‌آید. در ادامه با توجه به سیکل چرخشی سرعت درون خلیج، کنترهای تنش برشی نیز در اطراف مرکز خلیج تشکیل می‌گردد. با افزایش دبی کانال اصلی، سرعت در محدوده خلیج بیشتر شده و به دنبال آن تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۳۲ و ۳۳ توزیع تنش برشی در فاصله یک سانتی متری از بستر در محدوده خلیج میانی برای دبی‌ها  $0/017$  و  $0/033$  مترمکعب بر ثانیه آمده است.



شکل ۳۲. الگوی تنش برشی در خلیج میانی با عبور دبی  $0/017$  مترمکعب بر ثانیه



شکل ۳۳. الگوی تنش برشی در خلیج میانی با عبور دبی ۰/۳۳ مترمکعب بر ثانیه

### نتیجه‌گیری

این مطالعه با مقایسه نتایج نهایی مدل ریاضی و یافته‌های مدل فیزیکی نشان‌دهنده تعامل هیدرودینامیکی و اتصال بین جریان اصلی کانال و خلیج میانی می‌باشد که می‌تواند برای طراحی بهینه خلیج‌های میانی به عنوان بنادر رودخانه‌ای، استخرهای پرورش ماهی، حوضچه‌های گیرنده آلودگی و ... در آینده مورد استفاده قرار گیرد. خلاصه نتایج حاصل در این تحقیق عبارتند از:

- داده‌های حاصل از مدل فیزیکی و نتایج عددی ایجاد یک سیکل گردشی بزرگ مقیاس به همراه ناحیه سکون در مرکز خلیج را تایید می‌نمایند.  
- مدل‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار FLOW3D نشان داد که این نرم‌افزار دارای دقت مناسبی در شبیه‌سازی گردابه‌های خلیج میانی داشته است. همچنین از بین مدل‌های آشفتگی، مدل RNG بیشترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی داشته و با داشتن کمترین خطا نسبت به دومدل LES و  $K-\epsilon$  می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه نماید.

- الگوی سرعت کل، سرعت طولی و سرعت عرضی در خلیج مربعی مورد تحقیق دارای روند مشخصی بوده است به طوری که:  
- سرعت در محدوده خلیج بسیار کمتر از کانال اصلی بوده و کمترین مقدار سرعت در مرکز خلیج رخ می‌دهد. این امر می‌تواند در خلیج‌هایی که به عنوان استخرهای پرورش ماهی مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد توجه قرار گیرد. با افزایش دبی در کانال اصلی، جریان ورودی به خلیج نیز بیشتر شده و سرعت جریان افزایش می‌یابد.

- سرعت طولی ( $V_x$ ) در نیمه خارجی خلیج منفی و در نیمه داخلی مثبت می‌باشد این در حالی است که سرعت عرضی ( $V_y$ ) دارای دو بخش منفی و مثبت در محدوده نیمه بالادست و پایین دست می‌باشد. این پدیده نشان‌دهنده حرکت چرخشی پادساعتگرد خطوط جریان در محدوده داخلی خلیج میانی می‌باشد.

- با کاهش عمق جریان در دبی ثابت، اندازه سرعت طولی و عرضی در محدوده خلیج میانی افزایش می‌یابد.  
- شدت آشفتگی جریان مطابق با هسته چرخش بوده و بیشترین مقدار آن در لایه مرزی و گوشه پایین دست خلیج رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان در این نقطه آشفتگی بیشتری را پیش‌بینی نمود.

در پایان پیشنهاد می‌شود برای مطالعات بیشتر در زمینه خلیج‌های میانی، مدل فیزیکی برای شکل‌های دیگر خلیج میانی با شرایط مختلف انجام گرفته و مدل‌های عددی مناسب دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

### REFERENCES

- Akutina, Y., Gaskin, S. J., and Mydlarski, L. B. (2014). Entrainment mechanisms in river embayments. *In River Flow*. 31-37.
- Barton, A. F., Keller, R. J., and Katopodis, C. (2009). Verification of a numerical model for the prediction of low slope vertical slot fishway hydraulics. *Australasian Journal of Water Resources*. 13(1): 53-60.
- Bigillon, F., Nino, Y., and Garcia, M. H. (2006). Measurements of turbulence characteristics in an open-channel flow over a transitionally-rough bed using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. 41(6): 857-867.
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., and Peña, E. (2007). Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(2): 160-172.
- Chorda, J., Maubourguet, M. M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., and David, L. (2010). Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Research*. 48(2): 141-151.
- Faccenda, F. (2002). Experimental studies on recirculating flow patterns in a cavity. Master's project, McGill University, Montreal, Canada.



- Flow Science, Inc. (2011), FLOW-3D User's Manual. Flow Science, Inc., 10.0.1 editions.
- Gaskin, S., Kemp, L., and Nicell, J. (2002). Lagrangian tracking of specified flow parcels in an open channel embayment using phosphorescent particles. *In Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002*. 1-9.
- Goring, D. G., and Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of hydraulic engineering*. 128(1): 117-126.
- Guan, D., Agarwal, P., and Chiew, Y. M. (2018). Quadrant analysis of turbulence in a rectangular cavity with large aspect ratios. *Journal of Hydraulic Engineering*. 144(7): 04018035.
- Javrela, J. (2005). Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance. *Journal of Hydraulic Research*. 307: 233-241
- Keramaris, E., and Prinos, P. (2009). Flow characteristics in open channels with a permeable bed. *Journal of Porous Media*. 12(2): 155-165.
- Navas-Montilla, A., C. Juez, M.J. Franca, J. Murillo. (2019). Depth-averaged unsteady RANS simulation of resonant shallow flows in lateral cavities using augmented WENO-ADER schemes. *Journal of Computational Physics*. (395). 511: 536.
- Navas-Montilla, A., Martínez-Aranda, S., Lozano, A., García-Palacín, I., and García-Navarro, P. (2021). 2D experiments and numerical simulation of the oscillatory shallow flow in an open channel lateral cavity. *Advances in Water Resources*. 148: 103836.
- Prinos, P., Sofialidis, D., and Keramaris, E. (2003). Turbulent flow over and within a porous bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(9): 720-733.
- Sanjou, M., Nezu, I., and Okamoto, T. (2017). Surface velocity divergence model of air/water interfacial gas transfer in open-channel flows. *Physics of Fluids*. 29(4): 045107.
- Wahl, T. L. (2000). Analyzing ADV data using WinADV. In *Building partnerships* (pp. 1-10).
- Wahl, T. L. (2003). Discussion of "Despiking acoustic doppler velocimeter data" by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(6): 484-487. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:6(484)